



TESIS - RA142541

**KONFIGURASI DESAIN SELUBUNG BANGUNAN
PENDIDIKAN DENGAN SISTEM PENGHAWAAN
HIBRIDA DI IKLIM TROPIS LEMBAB**

HENNI

08111650040003

DOSEN PEMBIMBING

**Dr. Eng. Ir. Dipl. Ing. Sri Nastiti N.E., MT.
Ir. I Gusti Ngurah Antaryama, PhD.**

Program Magister

Bidang Keahlian Arsitektur Lingkungan

Departemen Arsitektur

Fakultas Arsitektur, Desain dan Perencanaan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

2018



TESIS - RA142541

**KONFIGURASI DESAIN SELUBUNG BANGUNAN
PENDIDIKAN DENGAN SISTEM PENGHAWAAN
HIBRIDA DI IKLIM TROPIS LEMBAB**

HENNI

08111650040003

DOSEN PEMBIMBING

Dr. Eng. Ir. Dipl. Ing. Sri Nastiti N.E., MT.

Ir. I Gusti Ngurah Antaryama, PhD.

Program Magister

Bidang Keahlian Arsitektur Lingkungan

Departemen Arsitektur

Fakultas Arsitektur, Desain dan Perencanaan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

2018



THESIS - RA142541

ENVELOPE CONFIGURATION DESIGN OF EDUCATIONAL BUILDING WITH HYBRID VENTILATION SYSTEM IN TROPICAL CLIMATE

HENNI

08111650040003

Supervisor

Dr. Eng. Ir. Dipl. Ing. Sri Nastiti N.E., MT.

Ir. I Gusti Ngurah Antaryama, PhD.

Magister Program

Environmental Architecture

Department of Architecture

Faculty of Architecture, Design and Planning

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

2018

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
oleh:
Henni
NRP. 08111650040003**

Tanggal Ujian : 6 Juni 2018
Periode Wisuda : September 2018

Disetujui oleh:

1.



Dr. Eng. Ir. Dipl. Ing. Sri Nastiti N.E., MT.
NIP. 196111291986012001

(Pembimbing I)

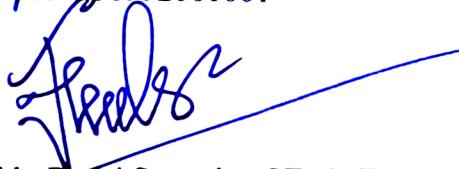
2.



Ir. I Gusti Ngurah Antaryama, PhD.
NIP. 196804251992101001

(Pembimbing II)

3.



FX Teddy Dadai Samodra, ST., MT., PhD.
NIP. 198004062008011008

(Penguji I)

4.



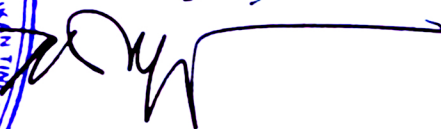
Dr. Arina H., ST., MT.
NIP. 197907052008122002

(Penguji II)



Fakultas Arsitektur, Desain dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dekan



Ir. Purwanita Setijanti, MSc., PhD.
NIP. 195904271985032001

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Henni
NRP : 08111650040003
Program Studi : Magister (S2)
Bidang Keahlian : Arsitektur Lingkungan

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan tesis saya dengan judul:

Konfigurasi Desain Selubung Bangunan Pendidikan dengan Sistem Penghawaan Hibrida di Iklim Tropis Lembab

adalah benar-benar karya intelektual mandiri, diselesaikan tanp menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 19 Juli 2018

Yang membuat pernyataan



Henni

NRP. 08111650040003

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat anugerah-Nya penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Konfigurasi Desain Selubung Bangunan Pendidikan dengan Sistem Penghawaan Hibrida di Iklim Tropis Lembab”. Tesis ini disusun sebagai syarat untuk menyelesaikan program S2 (Strata 2) pada Departemen Arsitektur, Fakultas Arsitektur, Desain, dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Tesis ini dapat diselesaikan karena bantuan dan dukungan dari banyak pihak, untuk itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Pembimbing tesis Dr. Eng. Ir. Dipl. Ing. Sri Nastiti N.E., MT. dan Ir. I Gusti Ngurah Antaryama, PhD. yang memberikan bimbingan serta pengarahan dalam proses penyelesaian tesis ini.
2. Penguji tesis FX Teddy Badai Samodra, ST., MT., PhD. dan Dr. Arina H., ST., MT. yang memberikan kritik, saran dan masukan terkait materi tesis ini.
3. Keluarga, teman-teman Arsitektur Lingkungan, serta semua pihak yang telah membantu penyusunan tesis.

Penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan tesis ini sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk perbaikan. Penulis berharap tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

KONFIGURASI DESAIN SELUBUNG BANGUNAN PENDIDIKAN DENGAN SISTEM PENGHAWAAN HIBRIDA DI IKLIM TROPIS LEMBAB

Nama mahasiswa : Henni
NRP : 08111650040003
Pembimbing 1 : Dr. Eng. Ir. Dipl. Ing. Sri Nastiti N.E., MT.
Pembimbing 2 : Ir. I Gusti Ngurah Antaryama, PhD.

ABSTRAK

Perubahan penerapan sistem penghawaan alami menjadi mekanis (AC) pada bangunan pendidikan, mendorong peningkatan konsumsi energi. Penerapan sistem penghawaan hibrida yang mengkombinasikan penghawaan alami dan AC merupakan usulan solusi memenuhi kenyamanan termal sekaligus efisiensi energi. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi pengaruh desain selubung bangunan serta mengelaborasi faktor desain yang mempengaruhi kinerja termal dan energi pendinginan bangunan pendidikan saat moda pasif dan aktif, guna mengindikasikan potensi penerapan sistem penghawaan hibrida. Penelitian ini juga bertujuan mendapatkan konfigurasi selubung bangunan pendidikan berpenghawaan hibrida yang menghasilkan kinerja termal yang baik serta efisien terhadap energi pendinginan.

Paradigma penelitian ini adalah kuantitatif positivisme dengan strategi eksperimen menggunakan simulasi. *Software* yang digunakan adalah DesignBuilder 5.0. Variabel desain selubung bangunan adalah aspek rasio, luas jendela, dan orientasi. Pengaruh desain selubung bangunan dianalisis terhadap kebutuhan energi pendinginan saat moda aktif dan presentase waktu tidak nyaman sesuai rekomendasi ASHRAE 55-2004 (*discomfort hour*) saat moda pasif. Tahap terakhir adalah optimasi.

Pengaruh aspek rasio terhadap kinerja termal dan energi tidak signifikan luas jendela dan orientasi. Peningkatan luas jendela meningkatkan energi pendinginan dan menurunkan *discomfort hour* pada model dengan orientasi Timur-Barat. Sebaliknya, peningkatan luas jendela meningkatkan *discomfort hour* pada model dengan orientasi Utara-Selatan. Hal ini disebabkan panas yang dilepas melalui penghawaan pada orientasi Timur-Barat lebih besar dari Utara-Selatan, karena arah angin terbanyak di Surabaya adalah Timur-Barat. Bangunan dengan sisi terpanjang menghadap Timur-Barat lebih sesuai untuk menerapkan sistem penghawaan hibrida di iklim tropis lembab. Perbaikan kinerja termal dan energi pendinginan masing-masing 4,3% dan 9,3% terhadap *base case* didapatkan pada model dengan aspek rasio 4, luas jendela 60,5 m² (WWR 31,5%), dan orientasi Timur-Barat.

Kata kunci: bangunan pendidikan, *discomfort hour*, energi pendinginan, penghawaan hibrida

ENVELOPE CONFIGURATION DESIGN OF EDUCATIONAL BUILDING WITH HYBRID VENTILATION SYSTEM IN TROPICAL CLIMATE

Student Name : Henni
Student Identity Number : 08111650040003
Supervisor : Dr. Eng. Ir. Dipl. Ing. Sri Nastiti N.E., MT.
Co-Supervisor : Ir. I Gusti Ngurah Antaryama, PhD.

ABSTRACT

Changes from natural ventilation to mechanical ventilation (AC) on educational buildings will increase energy consumption. The proposed solution is applying hybrid ventilation system, which combine natural and mechanical system (AC) to improve indoor thermal environment and reduce cooling energy demand. This study aims to identify the effect of envelope building design and elaborate design factor on building thermal performance and cooling energy in passive and active mode, to indicate the potency to apply hybrid ventilation. This study also aims to find the optimum envelope configuration of educational building with hybrid ventilation in tropical climate, which have good thermal performance and cooling energy efficient.

The research paradigm used in this study is quantitative (postivism) and experiment using simulation as the strategy. Simulation was performed using DesignBuilder 5.0. Envelope design variable are building aspect ratio, window size, and building orientation. The effect of envelope design on cooling energy demand (active mode) and discomfort hour based on ASHRAE 55-2004 recommendation (passive mode) is analyzed. The last step was optimization to find the optimum design configuration of educational building with hybrid ventilation in tropical climate.

The effect of building aspect ratio on thermal and energy performance is not as significant as window size and building orientation. Increase of window size is increasing cooling energy and decreasing discomfort hour for East-West oriented building. On the other hand, increase of window size is increasing discomfort hour for North-South oriented building. The reason is more heat losses through ventilation on East-West oriented buildings than North-South oriented building. East and West are the most frequent wind direction in Surabaya. Building elongated from North to South is more appropriate to use hybrid ventilation in Surabaya context. The most optimum configuration is East-West oriented building with aspect ratio 4 and window size $60,5 \text{ m}^2$ (WWR 31,5%). Thermal and cooling energy performance was improved 4,3% and 9,3% than base case.

Keywords: educational building, discomfort hour, cooling energy, hybrid ventilation

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN	i
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	ii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB 1	
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Rumusan permasalahan	4
1.3 Tujuan penelitian	5
1.4 Manfaat penelitian	5
1.5 Batasan penelitian.....	6
BAB 2	
KAJIAN PUSTAKA	7
2.1 Teori penunjang.....	7
2.1.1 Arsitektur dan lingkungan termal di iklim tropis lembab.....	7
2.1.2 Energi pendinginan bangunan	12
2.1.3 Konfigurasi bangunan perguruan tinggi	13
2.1.4 Sistem penghawaan alami dan karakteristik bangunan	15
2.1.5 Sistem penghawaan mekanis dan karakteristik bangunan.....	20
2.1.6 Sistem penghawaan hibrida dan karakteristik bangunan.....	22
2.1.7 Pengaruh bentuk dan orientasi terhadap kinerja bangunan	27
2.1.8 Pengaruh luas jendela terhadap kinerja termal dan energi bangunan..	30
2.2 Sintesis kajian pustaka.....	34
2.3 <i>State of the art</i>	36
BAB 3	
METODOLOGI PENELITIAN	39

3. 1 Paradigma penelitian	39
3.2 Metode penelitian	39
3.3 Identifikasi variabel	40
3.3.1 Variabel bebas dan definisi operasional	41
3.3.2 Variabel terikat dan definisi operasional	42
3.3.3 Variabel kontrol	43
3.4 Objek penelitian.....	44
3.5 Verifikasi	47
3.5.1 DesignBuilder	48
3.5.2 Objek verifikasi dan <i>input</i> simulasi	49
3.5.3 Pengukuran lapangan.....	53
3.5.4 Metode analisis hasil verifikasi	56
3.6 Rancangan eksperimen	57
3.7 Metode analisis dan presentasi data.....	66
3.7.1 Metode analisis data iklim.....	66
3.7.2 Metode analisis kinerja termal dan efisiensi energi.....	66
3.7.3 Metode analisis pengaruh desain terhadap kinerja termal dan energi .	67
3.7.4 Metode optimasi	68

BAB 4

VERIFIKASI DAN KINERJA OBJEK EKSPERIMEN	73
4.1 Hasil verifikasi.....	73
4.1.1 Verifikasi data iklim	73
4.1.2 Hasil verifikasi kondisi penghawaan alami	75
4.1.3 Hasil verifikasi kondisi penghawaan mekanis.....	77
4.2 Iklim makro Surabaya	78
4.2.1 Bulan terdingin	80
4.2.2 Bulan terpanas	81
4.3 Kinerja <i>base case</i>	82
4.4 Kinerja model eksperimen.....	88
4.4.1 Moda pasif	88
4.4.2 Moda aktif.....	92
4.5 Kinerja energi pendinginan pada model dengan aspek rasio berbeda....	95
4.6 Kinerja <i>discomfort hour</i> pada model dengan aspek rasio berbeda.....	97

4.7 Kinerja energi pendinginan pada model dengan luas jendela berbeda.	100
4.8 Kinerja <i>discomfort hour</i> pada model dengan luas jendela berbeda.....	102
4.9 Kinerja energi pendinginan pada model dengan orientasi berbeda.....	104
4.10 Kinerja <i>discomfort hour</i> pada model dengan orientasi berbeda	105
4.11 Faktor waktu terhadap penerapan strategi penghawaan hibrida.....	106
4.12 Rangkuman	109
BAB 5	
PEMBAHASAN HASIL EKSPERIMEN	111
5.1 Pengaruh aspek rasio pada kinerja bangunan berpenghawaan hibrida.	111
5.2 Pengaruh luas jendela pada kinerja bangunan berpenghawaan hibrida	116
5.3 Pengaruh orientasi pada kinerja bangunan berpenghawaan hibrida.....	125
5.4 Optimasi.....	129
5.4.1 Parameter <i>base case</i>	129
5.4.2 Parameter standar IKE dan SNI.....	133
5.5 Rangkuman	137
BAB 6	
KESIMPULAN DAN SARAN	141
6.1 Kesimpulan.....	141
6.1.1 Kinerja model eksperimen.....	141
6.1.2 Pengaruh desain selubung bangunan bersistem penghawaan hibrida	142
6.1.3 Konfigurasi teroptimum	144
6.2 Saran	146
DAFTAR PUSTAKA.....	149
LAMPIRAN	154
BIODATA PENULIS	167

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Zona nyaman berdasarkan ASHRAE 55-2004.....	11
Gambar 2. 2	Tipikal bentuk dan fasad bangunan perguruan tinggi di iklim tropis lembab.....	15
Gambar 2. 3	(a) Ilustrasi penghawaan di satu sisi (b) teknik penghawaan silang.....	17
Gambar 2. 4	Ilustrasi teknik penghawaan <i>passive stack</i>	18
Gambar 2. 5	Rata-rata radiasi matahari yang diterima permukaan bangunan di Jakarta dan sekitarnya.....	19
Gambar 2. 6	Tipikal bangunan dengan sistem penghawaan alami di iklim tropis.....	19
Gambar 2. 7	Diagram konsep sistem penghawaan hibrida.....	23
Gambar 2. 8	Bentuk bangunan yang dipelajari oleh DSD.....	29
Gambar 2. 9	Ilustrasi <i>window to wall ratio</i> pada fasad bangunan.....	31
Gambar 2. 10	Diagram landasan teori penelitian.....	36
Gambar 3. 1	Taktik tiap tahapan penelitian.....	41
Gambar 3. 2	Lokasi penelitian FTSP ITS.....	46
Gambar 3. 3	Aspek rasio dan WWR pada sampel penelitian.....	47
Gambar 3. 4	Lokasi dan tampak gedung B PWK	50
Gambar 3. 5	Model simulasi di DesignBuilder dengan bangunan di sekitarnya.....	52
Gambar 3. 6	Posisi titik ukur di ruang kelas 205-A.....	55
Gambar 3. 7	Titik ukur pada ruang seminar A	55
Gambar 3. 8	Titik ukur <i>outdoor</i> di lantai 4 gedung A PWK ITS.....	56
Gambar 3. 9	Metode analisis hasil verifikasi oleh Amos-Abanyie, Akuffo, dan Kutin-Sanwu (2013).....	57
Gambar 3. 10	Orientasi yang diuji dalam eksperimen.....	58
Gambar 3. 11	Ilustrasi variasi luas jendela yang diuji.....	60
Gambar 3. 12	Metode presentasi hubungan variabel bebas dan <i>discomfort hour</i>	67
Gambar 3. 13	Metode presentasi hubungan variabel bebas dan energi pendinginan	67
Gambar 3. 14	Grafik pengaruh desain terhadap kinerja bangunan.....	68
Gambar 3. 15	Metode presentasi beban pendinginan dan durasi <i>overheating</i>	69
Gambar 3. 16	Kuadran evaluasi bagian pertama.....	69
Gambar 3. 17	Kuadran evaluasi bagian dua.....	70
Gambar 4. 1	Perbandingan temperatur udara iklim mikro dan makro..	74
Gambar 4. 2	Perbandingan kelembaban udara iklim mikro dan makro	74
Gambar 4. 3	Perbandingan kecepatan angin iklim mikro dan makro...	75
Gambar 4. 4	Hubungan antara hasil pengukuran dan simulasi di ruang berpenghawaan alami.....	76
Gambar 4. 5	Hubungan antara hasil pengukuran dan simulasi di ruang berpenghawaan mekanis.....	78
Gambar 4. 6	Grafik rata-rata temperatur dan kelembaban udara tahun 2013 – 2017.....	79

Gambar 4. 7	<i>Wind rose</i> Surabaya tahun 2013 – 2017.....	80
Gambar 4. 8	Rata-rata kondisi iklim per jam bulan Januari 2017.....	81
Gambar 4. 9	Rata-rata kondisi iklim per jam bulan Oktober 2017.....	82
Gambar 4. 10	Kondisi <i>base case</i> saat bulan terdingin dan terpanas.....	83
Gambar 4. 11	Grafik rata-rata aliran panas per jam <i>base case</i> saat moda pasif di bulan terdingin (Januari).....	84
Gambar 4. 12	Grafik rata-rata aliran panas per jam <i>base case</i> saat moda pasif di bulan terpanas (Oktober).....	86
Gambar 4. 13	Grafik rata-rata aliran panas per jam <i>base case</i> saat moda aktif di bulan terdingin (Januari).....	87
Gambar 4. 14	Grafik rata-rata aliran panas per jam <i>base case</i> saat moda aktif di bulan terpanas (Oktober).....	88
Gambar 4. 15	Kinerja <i>discomfort hour</i> model eksperimen.....	89
Gambar 4. 16	Grafik aliran panas pada model D4T.....	90
Gambar 4. 17	Grafik aliran panas model C5S.....	91
Gambar 4. 18	Kinerja energi pendinginan model eksperimen.....	92
Gambar 4. 19	Grafik aliran panas model A1T.....	93
Gambar 4. 20	Grafik aliran panas model C5T.....	94
Gambar 4. 21	Kinerja energi pendinginan tiap aspek rasio (orientasi Timur-Barat)	95
Gambar 4. 22	Kinerja energi pendinginan tiap aspek rasio (orientasi Utara-Selatan)	97
Gambar 4. 23	Kinerja <i>discomfort hour</i> tiap aspek rasio (orientasi Timur-Barat)	98
Gambar 4. 24	Kinerja <i>discomfort hour</i> tiap aspek rasio (orientasi Utara-Selatan)	99
Gambar 4. 25	Kinerja energi pendinginan tiap luas jendela (orientasi Timur-Barat)	101
Gambar 4. 26	Kinerja energi pendinginan tiap luas jendela (orientasi Utara-Selatan)	101
Gambar 4. 27	Kinerja <i>discomfort hour</i> tiap luas jendela (orientasi Timur-Barat)	103
Gambar 4. 28	Kinerja <i>discomfort hour</i> tiap luas jendela (orientasi Utara-Selatan)	104
Gambar 4. 29	Kinerja energi pendinginan antara dua orientasi.....	105
Gambar 4. 30	Kinerja <i>discomfort hour</i> antara 2 orientasi.....	106
Gambar 4. 31	Rata-rata temperatur operatif per jam (ori Timur-Barat)..	107
Gambar 4. 32	Rata-rata temperatur operatif per jam (ori Utara-Selatan)	107
Gambar 5. 1	Hubungan aspek rasio dan energi pendinginan.....	112
Gambar 5. 2	<i>Heat balance</i> model eksperimen saat moda aktif.....	113
Gambar 5. 3	<i>Elemental breakdown</i> model dengan luas jendela 1 (orientasi Timur-Barat).....	113
Gambar 5. 4	Hubungan aspek rasio dan <i>discomfort hour</i>	114
Gambar 5. 5	Grafik keseimbangan panas (selisih <i>heat gain</i> dan <i>heat loss</i>).....	115
Gambar 5. 6	Temperatur udara tiap ruang pada model dengan luas jendela 4.....	116

Gambar 5. 7	Hubungan luas jendela dengan energi pendinginan.....	117
Gambar 5. 8	Keseimbangan panas tiap model saat moda aktif.....	118
Gambar 5. 9	Panas sensibel yang diterima jendela saat moda aktif.....	118
Gambar 5. 10	Perpindahan panas pada tiap elemen bangunan model dengan aspek rasio 1,75.....	119
Gambar 5. 11	Hubungan luas jendela dengan penerimaan panas oleh jendela.....	121
Gambar 5. 12	Hubungan penerimaan panas oleh jendela dan energi pendinginan.....	121
Gambar 5. 13	Hubungan luas jendela dengan <i>discomfort hour</i>	122
Gambar 5. 14	Pertukaran udara per jam tiap luas jendela.....	123
Gambar 5. 15	Hubungan luas jendela dan aliran panas melalui penghawaan.....	124
Gambar 5. 16	Grafik keseimbangan panas (selisih <i>heat gain</i> dan <i>heat loss</i>).....	125
Gambar 5. 17	Penerimaan radiasi matahari pada kedua orientasi.....	126
Gambar 5. 18	Rata-rata kinerja termal per jam model D5T dan D5S....	128
Gambar 5. 19	Aliran panas melalui penghawaan pada kedua orientasi..	129
Gambar 5. 20	Kuadran optimasi dengan parameter <i>base case</i>	130
Gambar 5. 21	Model dengan orientasi Timur-Barat pada kuadran optimasi.....	131
Gambar 5. 22	Perbaikan kinerja tiap model terhadap <i>base case</i> (Timur-Barat)	132
Gambar 5. 23	Model dengan orientasi Utara-Selatan pada kuadran optimasi dengan parameter <i>base case</i> (Utara-Selatan)....	132
Gambar 5. 24	Kuadran optimasi dengan parameter standar IKE dan SNI.....	134
Gambar 5. 25	Model dengan orientasi Timur-Barat pada kuadran optimasi.....	135
Gambar 5. 26	Model dengan orientasi Utara-Selatan pada kuadran optimasi.....	135
Gambar 5. 27	Presentase waktu pada kondisi termal tertentu.....	136
Gambar 6. 1	Model D4T dan konfigurasi jendela.....	145
Gambar 6. 2	Model D3T dan konfigurasi jendela.....	146

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Rentang nyaman dari beberapa studi.....	12
Tabel 2. 2	Elemen beban pendinginan.....	13
Tabel 2. 3	Perbandingan strategi perancangan bangunan dengan sistem penghawaan alami dan mekanis di iklim tropis lembab.....	26
Tabel 2. 4	Hubungan ukuran WWR inlet dan outlet pada dinding sejajar terhadap kecepatan angin rata-rata.....	33
Tabel 2. 5	Posisi penelitian pada road map penelitian Laboratorium Sains Arsitektur dan Teknologi.....	37
Tabel 2. 6	Rangkuman studi terdahulu terkait sistem penghawaan hibrida.....	38
Tabel 3. 1	Variabel bebas dalam penelitian ini.....	42
Tabel 3. 2	Variabel terikat dalam penelitian ini.....	43
Tabel 3. 3	Variabel kontrol.....	44
Tabel 3. 4	<i>Setting</i> waktu eksperimen.....	44
Tabel 3. 5	Persyaratan bangunan perguruan tinggi.....	45
Tabel 3. 6	Kriteria pemilihan sampel penelitian.....	46
Tabel 3. 7	Fitur yang dimiliki DesignBuilder.....	48
Tabel 3. 8	Karakteristik fisik gedung B PWK.....	50
Tabel 3. 9	Properti termal material bangunan untuk <i>input</i> simulasi.....	50
Tabel 3. 10	<i>Input</i> simulasi terkait sumber panas internal.....	51
Tabel 3. 11	Penyederhanaan pada model simulasi.....	51
Tabel 3. 12	<i>Input</i> pola okupansi serta penggunaan lampu dan AC selama pengukuran.....	53
Tabel 3. 13	<i>Input</i> pola okupansi serta penggunaan lampu dan AC selama pengukuran.....	53
Tabel 3. 14	Instrumen pengukuran kondisi termal bangunan.....	54
Tabel 3. 15	Standar verifikasi berdasarkan FEMP, ASHRAE, dan IPMVP.....	57
Tabel 3. 16	Klasifikasi nilai regresi.....	57
Tabel 3. 17	Aspek rasio yang diuji.....	59
Tabel 3. 18	Luas jendela yang akan diuji.....	60
Tabel 3. 19	Penamaan kode model eksperimen.....	61
Tabel 3. 20	Rancangan eksperimen untuk orientasi 90 ⁰	61
Tabel 3. 21	Klasifikasi nilai IKE.....	70
Tabel 3. 22	Rekomendasi kecepatan angin untuk mencapai kenyamanan termal.....	71
Tabel 4. 1	Hubungan hasil pengukuran dan simulasi saat moda pasif...	77
Tabel 4. 2	Hubungan hasil pengukuran dan simulasi saat moda pasif...	78
Tabel 4. 3	<i>Input</i> simulasi.....	83
Tabel 4. 4	Perbandingan karakter model A1S dan C5T.....	92
Tabel 4. 5	Perbandingan karakter model A1S dan C5T.....	95
Tabel 4. 6	Penggunaan moda pasif dan aktif untuk lantai 2 (orientasi Timur-Barat).....	108

Tabel 4.7	Penggunaan moda pasif dan aktif untuk lantai 1 (orientasi Timur-Barat).....	108
Tabel 4. 8	Penggunaan moda pasif dan aktif untuk lantai 1 (orientasi Utara-Selatan).....	108
Tabel 6. 1	Rekomendasi penerapan moda pasif dan aktif pada bangunan berorientasi Timur-Barat.....	147

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Data iklim makro dan mikro Surabaya (19 – 21 Februari 2018).....	154
Lampiran 2	Hasil pengukuran di ruang seminar A saat penghawaan alami.....	155
Lampiran 3	Hasil pengukuran di ruang 205 A saat kondisi AC menyala.	157
Lampiran 4	Data iklim Surabaya tahun 2013 – 2017.....	159
Lampiran 5	Data iklim Surabaya 2017 (rata-rata per jam).....	160
Lampiran 6	Model eksperimen.....	161
Lampiran 7	Setting simulasi di DesignBuilder.....	162
Lampiran 8	Properti termal material.....	164
Lampiran 9	Hasil eksperimen.....	165

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Indonesia terancam krisis energi. Mengutip pernyataan Menteri ESDM tahun 2015, bila proyek energi terbarukan tidak mencapai target dalam 10 tahun ke depan, Indonesia berada dalam ancaman serius krisis energi. Berdasarkan data Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), konsumsi energi final Indonesia mengalami peningkatan sekitar 1,3% per tahun selama tahun 2010 hingga 2015. Dalam kurun waktu tersebut, sektor komersial meliputi hotel, perkantoran, hingga bangunan pendidikan mengalami pertumbuhan sebesar 2,9%. Peranan sektor komersial terhadap total kebutuhan energi final diprediksi akan meningkat dari 3,6% pada tahun 2015 menjadi 6,3 – 6,4% pada tahun 2050. Perlu dilakukan penghematan kebutuhan energi pada sektor komersial.

Salah satu faktor yang berperan dalam peningkatan kebutuhan energi pada bangunan adalah AC. Studi penggunaan energi di beberapa bangunan di Jakarta menunjukkan sistem AC berkontribusi sekitar 47% hingga 65% dari total konsumsi energi bangunan (JICA, 2009). Pemanfaatan AC pada bangunan di daerah beriklim tropis terus mengalami peningkatan. Di Malaysia, jumlah pengguna AC diprediksi meningkat hingga 1,5 juta pada 2020 (Masjuki, Mahlia, dan Choudhur, 2001). Usaha efisiensi energi perlu dilakukan salah satunya dengan memanfaatkan sistem penghawaan hibrida. Sistem penghawaan hibrida adalah sistem yang menyediakan kenyamanan lingkungan internal menggunakan penghawaan alami dan mekanis sepanjang hari pada musim apapun (Wouters dkk, 1999). Penghematan energi 14 hingga 42% dapat diperoleh dengan menerapkan penghawaan hibrida pada bangunan (Ward dkk, 2012).

Bangunan pendidikan merupakan salah satu pengonsumsi energi terbesar di banyak negara. Bangunan pendidikan berada di urutan keempat bangunan dengan konsumsi energi terbesar di Amerika Serikat, di bawah retail, perkantoran, serta hotel dan restoran (Perez-Lombard, 2008). Di daerah beriklim tropis, konsumsi energi bangunan pendidikan juga meningkat (U.S. Department of Energy, 2004).

Fenomena tersebut disebabkan AC mulai digunakan untuk mewujudkan kenyamanan termal di bangunan pendidikan di daerah dengan dua musim (Hildebrand, 2012). Penekanan konsumsi energi di bangunan pendidikan dapat dilakukan dengan mengaplikasikan sistem penghawaan hibrida yang mengkombinasikan penghawaan alami dan mekanis sesuai kondisi iklim.

Di antara bangunan pendidikan lainnya, universitas atau perguruan tinggi memiliki konsumsi energi terbesar (Wang, 2016). Perguruan tinggi mewadahi fungsi yang lebih kompleks dibandingkan tingkat pendidikan lainnya. Energi yang besar diperlukan perguruan tinggi untuk kegiatan operasional (Trimunandar, Sawitri, dan Suprijono, 2015). Oleh karena itu, penelitian ini berkonsentrasi pada bangunan perguruan tinggi.

Bangunan perguruan tinggi di Indonesia khususnya milik pemerintah memiliki tipikal bentuk dan fasad layaknya bangunan berpenghawaan alami. Bangunan ramping memanjang dengan kedalaman ruang tunggal. Seperti yang diatur dalam Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 45 tahun 2007, bangunan pendidikan pemerintah tidak lebih dari 8 lantai dan umumnya terdiri atas 3 hingga 4 lantai. Konsekuensi bangunan bertingkat rendah hingga menengah di iklim tropis adalah atap menjadi elemen yang dominan menerima panas matahari (Hyde, 2007). Fasad didominasi jendela dan lubang/ kisi-kisi untuk memaksimalkan penghawaan dan pencahayaan alami. Karena ada kalanya penghawaan alami tidak dapat diandalkan untuk menyediakan kenyamanan termal di iklim tropis, bangunan perguruan tinggi mulai beralih menggunakan AC. Peralihan dari penghawaan alami menjadi penghawaan mekanis tanpa mengintegrasikan dengan rancangan bangunan eksisting akan memperburuk kinerja termal dan meningkatkan konsumsi energi (Tenorio, 2002).

Sistem penghawaan hibrida menjadi solusi yang mengkombinasikan penghawaan alami dan mekanis. Saat kondisi iklim mampu menyediakan kenyamanan termal, sistem penghawaan alami digunakan. Sebaliknya, sistem penghawaan mekanis digunakan saat kondisi iklim tidak mampu mewujudkan kenyamanan termal. Karakteristik bangunan dengan sistem penghawaan hibrida unik karena mewadahi penghawaan alami sekaligus mekanis. Strategi rancang bangunan dengan sistem penghawaan alami mendorong terjadinya pergerakan

angin dan meminimalisir penerimaan panas. Di sisi lain, bangunan dengan sistem penghawaan mekanis hanya fokus meminimalisir penerimaan panas. Akibatnya, beberapa strategi perancangan saling mendukung, sementara yang lainnya bertolak belakang. Tenorio (2002) melakukan penelitian terhadap hunian berpenghawaan hibrida untuk mengetahui strategi apa saja yang saling bertolak belakang. Aspek rancang yang saling bertolak belakang antara sistem penghawaan alami dan mekanis adalah penghawaan/infiltrasi dan WWR (*Window to wall ratio*).

Aspek rancang lain seperti bentuk bangunan dan orientasi juga saling bertentangan pada konteks iklim tropis. Bangunan yang dirancang berpenghawaan alami berbentuk ramping dengan kedalaman ruang tunggal (Hyde, 2007). Ruangan memiliki akses langsung ke ruang luar sehingga tingkat infiltrasi cukup tinggi dibandingkan bangunan dengan kedalaman ruang ganda. Bangunan ramping menerima radiasi panas dalam jumlah yang lebih besar dari bangunan kompak (Ling, Ahmad, & Ossen, 2007). Untuk mengalirkan angin, selubung bangunan berpenghawaan alami memiliki area bukaan yang cukup luas. Akibatnya, bila bangunan beralih menggunakan AC, elemen rancang tersebut dapat meningkatkan beban pendinginan sekaligus mengurangi kenyamanan termal dalam ruang. Diperlukan studi untuk mengetahui rancangan bangunan dengan sistem penghawaan hibrida yang sesuai untuk iklim tropis lembab.

Beberapa peneliti telah mempelajari pengaruh sistem penghawaan hibrida terhadap energi dan kenyamanan termal. Menassa (2013) menguji beberapa strategi penghawaan hibrida yang sesuai untuk gedung laboratorium di Madison, Amerika. Peneliti melaporkan strategi penghawaan hibrida yang ideal mampu menghemat beban pendinginan hingga 56%. Wang (2013) melaporkan penggunaan energi listrik perkantoran dapat berkurang 6 – 91% dengan penerapan penghawaan hibrida, bergantung iklim. Penghematan energi pada iklim panas seperti Miami, lebih sedikit dibandingkan iklim dingin. Chisholm (2015) menganalisis potensi pemanfaatan sistem penghawaan hibrida di iklim tropis monsoon Myanmar. Studi menunjukkan penghematan konsumsi energi 40 – 70% dibandingkan bangunan dengan sistem AC konvensional dapat terwujud dengan penghawaan hibrida. Penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan potensi peningkatan kinerja termal

dan efisiensi energi. Penelitian ini akan mempelajari rancangan bangunan yang sesuai untuk menerapkan strategi penghawaan hibrida di iklim tropis lembab.

1.2 Rumusan permasalahan

Bangunan pendidikan di daerah beriklim tropis awalnya dirancang memanfaatkan penghawaan alami (Hildebrand, 2012). Begitu pula yang terjadi pada bangunan perguruan tinggi di Indonesia. Karena tidak sepenuhnya dalam setahun penghawaan alami dapat diandalkan untuk menghadirkan kenyamanan termal (Tzonis, Lefaivre, dan Stagno, 2001), bangunan perguruan tinggi beralih menggunakan AC. Pengaplikasian AC tanpa mengintegrasikan dengan rancangan bangunan eksisting memperburuk kinerja termal dan meningkatkan konsumsi energi (Tenorio, 2002). Penerapan sistem penghawaan hibrida yang mengkombinasikan penghawaan alami dan mekanis menjadi solusi memenuhi kenyamanan termal sekaligus efisien terhadap energi. Saat kondisi iklim mampu menyediakan kenyamanan termal, sistem penghawaan alami digunakan. Sebaliknya, sistem penghawaan mekanis digunakan saat kondisi iklim tidak mampu mewujudkan kenyamanan termal.

Karakteristik bangunan dengan sistem penghawaan hibrida harus mampu mewadahi strategi rancang sistem penghawaan alami dan mekanis sekaligus (Wouters dkk, 1999). Aspek rancang bangunan berpenghawaan alami dan mekanis saling mempengaruhi, baik saling mendukung maupun bersifat kontradiktif. Strategi rancang bangunan dengan sistem penghawaan alami mendorong terjadinya pergerakan angin dan meminimalisir penerimaan panas (Szokolay S. V., 2004). Konsekuensinya bangunan memanjang dengan kedalaman ruang tunggal. Selubung bangunan memiliki area bukaan yang cukup luas untuk mengalirkan angin. Sebaliknya, strategi rancang bangunan dengan sistem penghawaan mekanis fokus meminimalisir penerimaan panas sehingga bentuk yang diusulkan cenderung kompak (Lechner, 2001). Bukaan yang lebar dan bidang transparan, dihindari pada bangunan bersistem penghawaan mekanis karena akan meningkatkan perolehan panas. Permasalahan penelitian adalah strategi rancang yang memiliki pengaruh berlawanan terhadap kinerja termal dan energi pada bangunan yang semula dirancang berpenghawaan alami dan akan menerapkan sistem penghawaan hibrida

(yang juga mewadahi penghawaan mekanis). Dari permasalahan tersebut, pertanyaan penelitian yang diajukan adalah:

1. Bagaimana pengaruh konfigurasi desain selubung bangunan terhadap kinerja termal dan energi pada bangunan yang semula dirancang berpenghawaan alami namun beralih menerapkan sistem penghawaan hibrida?
2. Bagaimana konfigurasi selubung bangunan pendidikan dengan sistem penghawaan hibrida yang menghasilkan kinerja termal dan energi yang lebih baik dibandingkan *base case* di iklim tropis lembab?

1.3 Tujuan penelitian

- Mengidentifikasi pengaruh desain selubung bangunan terhadap kinerja termal dan energi pada bangunan yang semula dirancang berpenghawaan alami namun beralih menerapkan sistem penghawaan hibrida.
- Merumuskan konfigurasi selubung bangunan pendidikan berpenghawaan hibrida yang menghasilkan kinerja termal dan energi yang lebih baik dibandingkan *base case* di iklim tropis lembab.

1.4 Manfaat penelitian

- Secara teoritis, bagi akademisi memperkaya teori bidang termal dan energi melalui pengolahan desain selubung bangunan di iklim tropis lembab. Lingkup penelitian ini adalah bangunan pendidikan bertingkat rendah (3 lantai) yang awalnya dirancang berpenghawaan alami namun akan menerapkan penghawaan hibrida.
- Secara praktis, bagi arsitek memberikan referensi perancangan selubung bangunan pendidikan yang akan memanfaatkan penghawaan hibrida untuk kinerja termal yang baik dan efisien terhadap energi. Rekomendasi ini meliputi aspek rancang bentuk bangunan (aspek rasio), orientasi, dan luas jendela.

1.5 Batasan penelitian

- Substansi penelitian

Penelitian berkonsentrasi pada pengaruh desain selubung bangunan terhadap kinerja termal dan energi pendinginan. Kinerja termal diukur saat moda pasif sementara energi pendinginan dievaluasi saat moda aktif. Indikator kinerja termal bangunan adalah faktor lingkungan dan periode ketidaknyamanan (*discomfort hour*) berdasarkan ASHRAE 55-2004. Parameter evaluasi adalah kondisi *base case*. Elemen desain selubung bangunan yang akan diteliti dibatasi yang bersifat saling bertolak belakang antara sistem penghawaan alami dan mekanis. Fokus studi ini adalah elemen desain selubung bangunan terkait bentuk bangunan dan orientasinya, serta komposisi material transparan/bukaan.

- Objek penelitian

Objek penelitian berupa bangunan perguruan tinggi pemerintah yang awalnya dirancang berpenghawaan alami namun beralih menggunakan AC. Dalam studi ini, fokus penelitian adalah bangunan perkuliahan yang terdiri atas ruang-ruang kelas. Material bangunan yang digunakan perguruan tinggi pemerintah menjadi variabel kontrol.

- Sistem penghawaan

Penghawaan hibrida yang menjadi fokus dalam penelitian ini adalah kombinasi penghawaan alami (penghawaan silang) dengan penghawaan mekanis (AC) secara bergantian. Bangunan diuji ketika memanfaatkan penghawaan alami secara penuh dalam suatu kurun waktu. Selanjutnya dalam kurun waktu yang sama, bangunan kembali diuji saat memanfaatkan penghawaan mekanis. Tujuannya untuk mengetahui kinerja bangunan pada kedua moda tersebut.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Teori penunjang

2.1.1 Arsitektur dan lingkungan termal di iklim tropis lembab

Iklim tropis lembab terjadi di wilayah sekitar garis khatulistiwa hingga rentang 15⁰ lintang Utara dan Selatan (Koenigsberger dkk, 1974). Karena posisinya, bangunan di iklim tropis lembab menerima radiasi panas dalam jumlah besar. Perbedaan antar musim umumnya hanya berupa curah hujan atau angin yang berhembus. Rata-rata suhu udara di siang hari antara 27 - 32°C. Variasi diurnal yang kecil, tidak melebihi 5K, mengakibatkan pemanfaatan *mass effect* kurang sesuai di iklim tropis lembab (Szokolay, 2004). Kelembaban yang relatif tinggi, antara 55% hingga 100%, berdampak pada kurang efektifnya pendinginan secara evaporatif. Curah hujan bervariasi antara 2000 hingga 5000 mm. Kecepatan angin cukup rendah namun angin kencang kadang terjadi saat akan turun hujan.

Karakteristik di atas merupakan faktor lingkungan yang mempengaruhi kenyamanan termal di iklim tropis. Radiasi matahari meningkatkan suhu udara dalam ruang. Kondisi tersebut dapat diselesaikan dengan menerapkan strategi pendinginan. Lechner (2001) menyatakan dari lima jenis strategi pendinginan pasif hanya penghawaan (*comfort ventilation*) yang efektif untuk iklim tropis. Permasalahan lainnya adalah kelembaban yang tinggi. Kelebihan uap air perlu dihilangkan untuk mewujudkan kenyamanan dalam ruang. Lingkungan termal di iklim tropis lembab cukup sulit diselesaikan hanya dengan mengandalkan sistem pasif (Hyde, 2007). Penggunaan sistem mekanis (AC) merupakan salah satu upaya mengurangi kelembaban dalam ruang (Awbi, 2007). Penggunaan sistem mekanis pada bangunan di iklim tropis tidak dapat dihindarkan (Tzonis dkk, 2001).

Arsitektur merupakan suatu sistem termal dengan beragam *input* dan *output* panas. Keseimbangan termal di suatu bangunan dirumuskan dengan persamaan berikut.

$$Q_i + Q_s \pm Q_c \pm Q_v \pm Q_m - Q_e = 0 \quad (2.1)$$

Keseimbangan termal dirumuskan dengan *input* panas internal dari penghuni bangunan, lampu, dan alat elektronik lainnya (Q_i) ditambah radiasi matahari (Q_s) ditambah atau dikurangi dengan konduksi (Q_c), konveksi (Q_v), maupun radiasi (Q_m) dikurangi proses pendinginan dengan evaporasi (Q_e) sama dengan 0. Bila hasilnya negatif, temperatur udara dalam bangunan rendah. Sebaliknya, bila lebih dari 0, temperatur udara dalam bangunan meningkat. Arsitektur dengan kinerja termal yang baik menghasilkan kenyamanan termal bagi penghuninya.

Perpindahan panas melalui pada bangunan terjadi secara konduksi, konveksi, dan radiasi.

$$Q_c = A \cdot u \cdot (T_o - T_i) \quad (2.2)$$

$$Q_v = 0,33 \cdot N \cdot Vol \cdot (T_o - T_i) \quad (2.3)$$

$$N = \frac{Cv \cdot v \cdot A}{Vol} \times 3600 \quad (2.4)$$

Berdasarkan rumus tersebut, variabel yang mempengaruhi perpindahan panas dalam kondisi *steady-state* adalah (Markus dan Morris, 1980: 373):

- selubung bangunan (ΣAU)
- laju ventilasi (N /pertukaran udara per jam, volume ruang)
- perbedaan temperatur (ΔT)

Bentuk bangunan berkaitan dengan luas selubungnya (A) sementara material bangunan menentukan *U-value*. Konstruksi jendela berkaitan dengan laju ventilasi. Pada iklim tropis lembab, penerimaan panas perlu diminimalisir.

Bangunan dengan kinerja termal yang baik mampu mewujudkan kenyamanan termal bagi penghuni bangunan. Kenyamanan termal adalah kondisi pikiran manusia yang menunjukkan kepuasan terhadap lingkungan termal. Kenyamanan termal dipengaruhi faktor lingkungan (suhu udara, MRT, kelembaban, dan kecepatan angin) dan personal (metabolisme, jenis pakaian). Pada bangunan berpenghawaan alami, temperatur udara dan kelembaban dipengaruhi kondisi ruang luar sementara MRT dipengaruhi material selubung bangunan.

a. Temperatur udara

Temperatur menunjukkan gejala adanya panas di suatu substansi (Szokolay S. V., 2004). Temperatur udara adalah indikator gejala panas di udara. Temperatur

udara disebut juga temperatur bola kering (*dry bulb temperature*). Perbedaan temperatur bola kering dan basah (*wet bulb temperature*) adalah ada tidaknya indikator kelembaban. Bila temperatur bola kering adalah temperatur udara yang diukur tanpa menghitung kelembaban, temperatur bola basah memperhitungkan kelembaban. Saat udara jenuh, proses evaporasi tidak akan terjadi sehingga nilai temperatur bola basah sama dengan temperatur bola kering. Temperatur udara dalam sebuah ruangan dipengaruhi perpindahan panas yang terjadi di ruang itu, baik secara konduksi, konveksi, maupun evaporasi. Di Indonesia, rentang nyaman yang direkomendasikan SNI 6390 tahun 2011 tentang Konservasi Energi Sistem Tata Udara Bangunan Gedung adalah temperatur bola kering $24 - 27^{\circ}\text{C}$ atau $25,5^{\circ}\text{C} \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ dengan kelembaban relatif $60\% \pm 5\%$.

b. Kelembaban udara

Kelembaban udara mempengaruhi proses evaporasi yang dilakukan tubuh manusia. Pada lingkungan yang panas, pendinginan secara evaporatif seperti berkeringat merupakan salah satu cara melepaskan panas dengan penguapan air di kulit. Namun, bila lingkungan panas dan lembab, air tidak dapat menguap sehingga kulit menjadi lembab dan pendinginan berkurang. Dalam grafik *psychrometry*, terdapat istilah kelembaban absolut atau *humidity ratio*. Kelembaban absolut adalah perbandingan berat uap air (*moisture*) dengan berat udara kering pada gabungan udara dan uap air. Kondisi dikatakan jenuh bila udara tidak dapat lagi menyokong uap air. Jumlah maksimum uap air yang dapat ditampung udara pada temperatur tertentu disebut kelembaban saturasi (*saturation humidity*). Kelembaban relatif (*relative humidity*) adalah perbandingan kelembaban saturasi dengan kelembaban absolut yang dinyatakan dalam persen.

c. Mean Radiant Temperature (MRT)

Perpindahan panas secara radiasi bergantung pada temperatur permukaan di sekeliling seseorang dan diukur dengan MRT. *Mean radiant temperature (MRT)* merupakan temperatur seragam dari selubung hitam imajiner yang melepas panas dalam jumlah yang sama dengan pelepasan panas secara radiasi oleh seseorang. MRT merupakan rata-rata temperatur semua permukaan di sekeliling seseorang, dibobotkan dengan sudut titik pengukuran seperti yang ditunjukkan rumus 2.5.

MRT sangat dipengaruhi temperatur tiap permukaan dan sudutnya terhadap titik ukur.

$$MRT = \sqrt[4]{T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_n^4 F_{p-n}} \quad (2.5)$$

T merupakan temperatur permukaan dalam Kelvin dan F_{p-n} adalah sudut antara seseorang dengan permukaan tersebut. Pada iklim hangat dengan clo yang tipis, MRT berperan signifikan dalam mempengaruhi temperatur lingkungan (*environmental temperature*) hingga dua kali temperatur bola kering atau 66% (Szokolay, 2004).

$$\text{Temperatur lingkungan} = \frac{2}{3} MRT + \frac{1}{3} DBT \quad (2.6)$$

Di dekat rentang nyaman, perbedaan temperatur bola kering dan MRT tidak boleh melebihi 3 K. Salah satu cara untuk mengukur MRT dengan bantuan *globe thermometer*. Alat ini berfungsi untuk mengukur kombinasi pengaruh radiasi, suhu udara, dan kecepatan angin. Alat ini terdiri atas bola hitam (*matte*) untuk menyerap radiasi, serta terdapat sensor suhu ditengahnya. Saat keadaan *steady state* (perpindahan panas secara konveksi dan radiasi seimbang), suhu yang direkam berada antara suhu udara dan radiasi, yang dikenal dengan *globe temperature*. *Globe temperature* (GT) akan memiliki nilai yang sama atau identik dengan MRT bila udara tenang (*still*) dan tidak ada perpindahan panas secara konveksi antara bola dan udara. Rumus dibawah merupakan cara menemukan MRT jika nilai GT dan kecepatan udara (m/s) diketahui.

$$MRT = [(GT + 273)^4 + \frac{1,1 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0,6}}{\epsilon \cdot D^{0,4}} (GT - T_a)]^{1/4} - 273 \quad (2.7)$$

V_a adalah kecepatan angin, ϵ adalah emisivitas, dan D adalah diameter bola hitam. Saat kecepatan angin 0 m/s, nilai MRT sama dengan GT.

d. Temperatur operatif

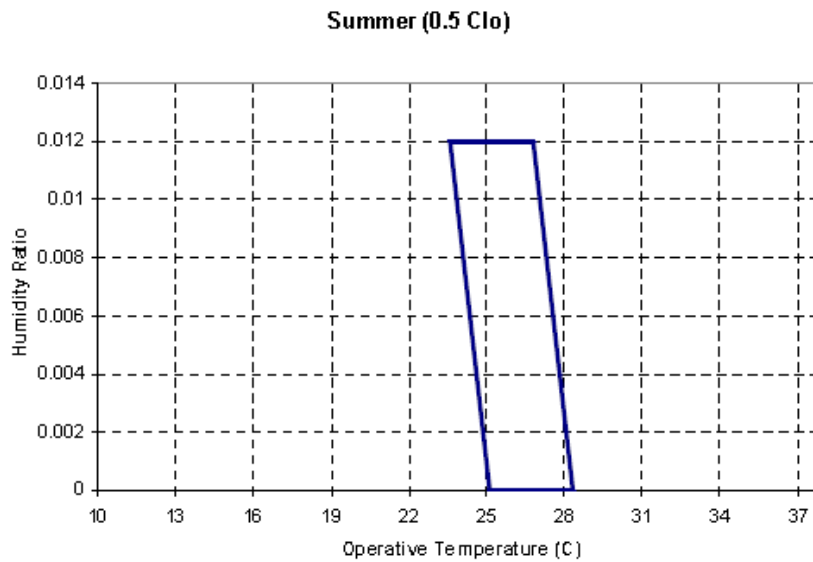
Temperatur operatif adalah temperatur seragam dari permukaan imajiner dimana penghuni mengalami perpindahan panas dalam jumlah yang sama dengan radiasi dan konveksi. Temperatur operatif tidak terkait dengan aktivitas dan pakaian

penghuni. Temperatur operatif merupakan rata-rata MRT dan temperatur udara (T_a), masing-masing dibobotkan dengan koefisien perpindahan panas.

$$T_o = T_a + (1 - A)(T_r - T_a) \quad (2.8)$$

$$A = \frac{\alpha_c}{\alpha_c + \alpha_r} \quad (2.9)$$

dimana α_c dan α_r adalah koefisien perpindahan panas secara konveksi dan radiasi ($\text{W/m}^2\text{K}$). Temperatur operatif tidak terkait dengan aktivitas dan pakaian penghuni. Gambar 2.1 menunjukkan zona nyaman pada grafik temperatur operatif dan *humidity ratio* atau kelembaban absolut untuk 0,5 clo.



Gambar 2. 1 Zona nyaman berdasarkan ASHRAE 55-2004 (DesignBuilder user manual, 2009)

e. Kecepatan angin

Kecepatan angin memberikan efek pendinginan fisiologis bagi penghuni bangunan. Kecepatan angin yang tinggi dapat menggeser zona nyaman pada temperatur udara yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan kecepatan angin mempengaruhi perpindahan panas secara konveksi antara tubuh manusia dan udara di sekitarnya. Kecepatan angin yang tinggi meningkatkan laju evaporasi dan menimbulkan sensasi dingin. Dalam studi ini, angin diperhitungkan dalam perpindahan panas secara konveksi.

Suatu lingkungan termal dikatakan nyaman bila 80% penghuni bangunan merasa puas (ASHRAE 55, 2004). Standar yang direkomendasikan ASHRAE

menjadi acuan dalam studi ini. Meskipun begitu, beberapa peneliti melaporkan rentang kenyamanan termal dapat bergeser dalam konteks iklim tropis. Wong dan Khoo (2005) mempelajari kenyamanan termal pada ruang kelas berpenghawaan alami di Singapura. Hasilnya, suhu udara yang diterima (*acceptable*) antara 27,1 – 29,3°C. Nilai yang lebih tinggi dari standar ASHRAE 55: 2004 diakibatkan adanya adaptasi oleh penghuni bangunan sehingga tingkat toleransi terhadap kondisi termal lebih tinggi. Tabel 2.1 menunjukkan rentang nyaman dari beberapa studi.

Tabel 2. 1 Rentang nyaman dari beberapa studi

Sumber/ peneliti	Lokasi	Jenis bangunan	Jenis penghawaan	Indeks termal	Rentang nyaman
ASHRAE 55:2004				Tempera- tur efektif (Te)	23 – 26°C
SNI 6390 - 2011				Ta	25,5 ± 1,5°C RH 60 ± 5%
Karyono (2000)	Indonesia	Kantor	Alami	Ta	24,7°C
			Mekanis	To	26,7 °C
Wong dan Khoo (2005)	Singapura	Sekolah	Alami	Ta	27,1 – 29,3°C
Damiati dkk (2016)	Indonesia	Kantor	Alami	To	24,7°C ± 2,7°C
			Mekanis	To	26,3°C ± 2,3° C
			Hibrida	To	27,5°C ± 2,2° C

sumber: ASHRAE 55:2004; SNI 6390-2011; Kwong dkk, 2014; Damiati dkk, 2016

2.1.2 Energi pendinginan bangunan

Kinerja termal bangunan berdampak pada beban pendinginan dan energi yang dibutuhkan. Ketika suhu udara tidak dapat diturunkan dengan penghawaan alami, dibutuhkan energi untuk penghawaan mekanis. Penelitian terhadap bangunan perkantoran bertingkat tinggi di Malaysia oleh Lau (2016) menunjukkan 45,9% dari total konsumsi energi bangunan digunakan untuk pendinginan. Bangunan dengan kinerja termal yang baik memiliki beban pendinginan serta membutuhkan energi dalam jumlah kecil. Penghematan energi dapat dilakukan dengan melakukan optimasi terhadap arsitektur. Penghematan energi hingga 31,4%

dari keadaan semula diperoleh dengan melakukan optimasi terhadap selubung apartemen di iklim tropis lembab (Cheung dkk, 2005).

Energi pendinginan merupakan akumulasi beban pendinginan sensibel dan laten dalam satuan kWh. Beban pendinginan menunjukkan seberapa jumlah panas dalam ruang yang harus dihapus sistem AC untuk menjaga temperatur udara dalam kondisi nyaman. Seperti halnya panas, beban pendinginan juga dibagi menjadi beban pendinginan sensibel dan laten. Beban pendinginan sensibel adalah panas ‘kering’ yang hanya berhubungan dengan temperatur bola kering dan dapat diukur dengan termometer. Faktor yang mempengaruhi beban pendinginan sensibel diantaranya selubung bangunan dan material (dinding, kaca, atap), partisi, lantai, infiltrasi, penghuni bangunan, peralatan elektronik, dan lampu. Sementara beban pendinginan laten terkait dengan temperatur bola basah dan melibatkan perubahan wujud zat, misalnya perubahan air menjadi uap air. Total beban pendinginan merupakan akumulasi beban pendinginan sensibel dan laten. Pada prinsipnya, perhitungan beban pendinginan memperhitungkan beban panas selubung, beban panas internal, beban panas karena ventilasi dan infiltrasi (Juwana, 2005). Tabel 2.2 menunjukkan elemen beban pendinginan. Beban pendinginan yang tinggi menunjukkan bangunan akan mengonsumsi energi yang tinggi pula.

Tabel 2. 2 Elemen beban pendinginan

No.	Elemen beban pendinginan	Aspek yang mempengaruhi
1.	<i>Envelope/building sensible heat load (BSL)</i>	Luas permukaan selubung, komposisi selubung (kaca/ massif), orientasi
2.	<i>Internal load (OCC)</i>	Jumlah penghuni, beban lampu dan peralatan elektronik
3.	<i>Ventilation & infiltration load (CFM)</i>	Volume ruang, pertukaran udara (ACH), temperatur dan kelembaban udara
Beban pendinginan sensibel = BSL + OCC + CFM		(2. 10)

sumber: Juwana, 2005

2.1.3 Konfigurasi bangunan perguruan tinggi

Penelitian ini dilatarbelakangi fenomena bangunan perguruan tinggi yang awalnya dirancang berpenghawaan alami namun beralih menggunakan AC.

Fenomena tersebut terjadi pada perguruan tinggi negeri di Indonesia. Perguruan tinggi adalah satuan pendidikan yang menyelenggarakan pendidikan tinggi. Perguruan tinggi terbagi atas beberapa bangunan dengan fungsi beragam, seperti ruang kelas, laboratorium, kantor administrasi, ruang dosen, dan sebagainya. Fokus penelitian ini adalah bangunan perkuliahan yang terdiri atas ruang-ruang kelas atau ruang dengan fungsi serupa.

Perancangan perguruan tinggi pemerintah diatur dalam Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 45 tahun 2007. Perguruan tinggi tergolong bangunan pemerintah tidak sederhana atau gedung negara yang memiliki kompleksitas atau teknologi tidak sederhana. Jarak antar bangunan yang disarankan minimum 3 m. Ketinggian bangunan maksimum 8 lantai dengan ketinggian plafon minimum 2,8 m. Bangunan perkuliahan umumnya memiliki 3 – 4 lantai dengan kedalaman ruang tunggal (bangunan ramping). Konsekuensi bangunan bertingkat rendah hingga menengah di iklim tropis adalah atap menjadi elemen yang dominan menerima panas matahari. Pembayangan oleh atap membuat area dinding tidak terekspos matahari secara langsung.

Bangunan perkuliahan umumnya memiliki fasad yang didominasi jendela. Gambar 2.2 menunjukkan tipikal bentuk dan fasad bangunan perguruan tinggi di iklim tropis lembab. Jendela terdiri atas jendela yang dapat dioperasikan (buka/tutup) untuk penghawaan alami dan jendela mati (tidak dapat dioperasikan) untuk pencahayaan alami (Hildebrand, 2012). Selain jendela, beberapa bangunan juga memiliki lubang angin/ kisi-kisi pada fasadnya. Namun, karena beralih menggunakan AC, lubang angin/ kisi-kisi tersebut akhirnya ditutup. Untuk mencegah panas dan air hujan masuk dalam ruang, fasad bangunan dilengkapi peneduh. Jenis peneduh yang umum digunakan di bangunan perguruan tinggi pemerintah adalah *overhang* dan *horizontal louvers*. Tipikal fasad bangunan perguruan tinggi negeri dirancang untuk memaksimalkan penghawaan alami. Konsekuensinya terhadap beban pendinginan saat menggunakan AC perlu dipelajari lebih lanjut.

Material bangunan perguruan tinggi negeri juga diatur dalam Peraturan Menteri. Material dinding luar yang dipersyaratkan adalah bata, batako dipleser dicat atau dilapisi keramik, kaca, atau panil beton ringan. Pilihan material dinding

dalam adalah bata, batako, kaca, atau partisi *gypsum*. Material penutup atap yang dipersyaratkan adalah genteng keramik atau aluminium gelombang dicat sementara pilihan material plafon diantaranya *gypsum* atau kayu lapis dicat. Untuk lantai, pilihan materialnya adalah marmer lokal, keramik, vinil, atau kayu. Karakteristik material bangunan perguruan tinggi negeri akan menjadi variabel kontrol dalam penelitian ini.



Gambar 2. 2 Tipikal bentuk dan fasad bangunan perguruan tinggi di iklim tropis lembab

Suatu ruang kuliah dapat digunakan secara bergantian oleh beberapa mata kuliah dalam satu hari. Tiap mata kuliah juga memiliki tingkat okupansi yang beragam, apakah ruang terisi penuh atau hanya terisi sebagian. Dalam studi ini, ruang kuliah disesuaikan diasumsikan terisi penuh selama waktu kuliah kecuali saat istirahat pukul 12.00 – 13.00. Pola dan tingkat okupansi ruang kuliah menjadi variabel kontrol dalam studi ini.

2.1.4 Sistem penghawaan alami dan karakteristik bangunan

Ventilasi atau penghawaan adalah proses memasukkan udara ‘bersih’ ke dalam ruang dimana sebagian udara lainnya dikeluarkan (Liddament, 1996).

Penghawaan juga diperhitungkan sebagai strategi yang efisien terhadap energi dalam mencapai kenyamanan termal. Wouters dkk (1999) secara eksplisit membagi tujuan penghawaan menjadi dua kelompok, yaitu penghawaan untuk kualitas udara dalam ruang (IAQ) dan penghawaan sebagai strategi mencapai kenyamanan termal. Dalam studi ini, penghawaan berperan sebagai strategi mencapai kenyamanan termal. Terdapat tiga faktor yang mendorong terjadinya penghawaan alami (Liddament, 1996), yaitu:

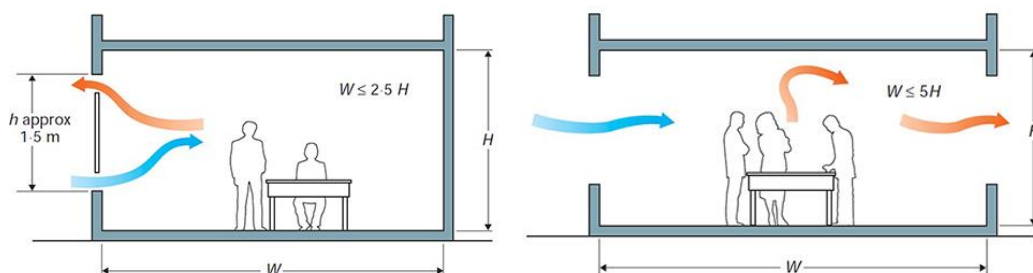
- Tekanan udara: Angin yang menerpa bangunan menimbulkan tekanan positif di sisi angin datang (*windward face*) dan tekanan negatif di sisi sebaliknya (*leeward face*). Angin akan mengalir dari tekanan tinggi ke tekanan rendah. Studi sebelumnya menunjukkan penghawaan karena perbedaan tekanan udara lebih efektif diterapkan di daerah tropis dibandingkan perbedaan suhu udara (Aflaki, dkk, 2015). Hal ini disebabkan tidak adanya perbedaan signifikan antara suhu dalam dan luar ruang.
- Perbedaan suhu udara: Perbedaan suhu dan massa jenis udara di dalam dan luar bangunan mengakibatkan pergerakan udara. Saat suhu udara dalam ruang lebih tinggi dari luar, udara masuk melalui bukaan di bagian bawah bangunan dan keluar melalui bukaan di bagian yang lebih tinggi. Aliran udara akan terbalik bila suhu udara dalam ruang lebih rendah dari luar. Penghawaan akan terjadi dengan efektif bila terdapat perbedaan signifikan antara suhu dalam dan luar ruang.
- Kombinasi tekanan udara dan perbedaan suhu: Sistem ini mengutamakan agar tekanan udara dan perbedaan suhu saling berkomplemen untuk mengalirkan udara pada bangunan. Hal ini dapat dicapai dengan memahami distribusi tekanan pada masing-masing mekanisme dan menentukan lokasi bukaan. Atria merupakan salah satu contoh penerapan sistem ini.

Teknik menyediakan penghawaan alami yang dipilih menentukan bentuk bangunan. Teknik untuk menyediakan penghawaan alami pada bangunan (Liddament, 1996) adalah:

- Penghawaan di satu sisi: Bukaan hanya terdapat di salah satu sisi ruang sehingga tidak direkomendasikan untuk mencapai penghawaan yang baik. Penambahan jumlah bukaan pada satu dinding dapat meningkatkan aliran

angin. Terdapat batasan jarak maksimum angin dapat masuk ke dalam bangunan melalui bukaan. Jarak yang disarankan 2 - 2,5 dikali tinggi langit-langit (sekitar 6 – 10 m) diukur dari bukaan (Gambar 2.3a).

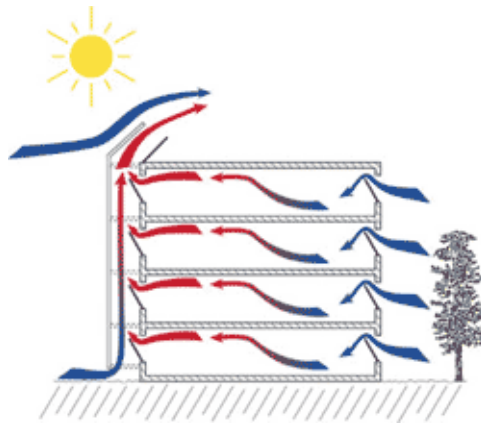
- Penghawaan silang: Penghawaan silang dicapai dengan membuat jalur aliran udara yang jelas antara *inlet* dan *outlet* sehingga angin mengalir melalui zona okupansi. Gambar 2.3b menunjukkan acuan kedalaman ruang maksimum untuk teknik ini, yaitu lima kali tinggi langit-langit (sekitar 15 m). Teknik ini sesuai untuk iklim tropis lembab.
- *Passive stack ventilation*: Udara mengalir melalui cerobong akibat kombinasi gaya tekan dan hisap, seperti yang ditunjukkan gambar 2.4. Teknik penghawaan ini mengandalkan perbedaan massa jenis dimana udara yang lebih panas akan naik bila suhu dalam ruang lebih tinggi dari luar ruang. Keadaan akan terbalik bila suhu dalam ruang lebih rendah dari luar ruang. Teknik ini sesuai untuk iklim moderat, khususnya saat musim dingin.
- Menara angin: Ketika angin dapat diandalkan untuk menyediakan penghawaan alami, cerobong dapat difungsikan sebagai menara angin. Bukaan diorientasikan ke arah datangnya angin sehingga aliran udara karena angin dapat mengalir di bangunan.
- *Atria*: atrium umumnya berupa *courtyard* dengan atap kaca. Penghawaan alami dapat diaplikasikan menggunakan atrium sebagai *passive stack*. Ketinggian dan ukuran bukaan atrium perlu disesuaikan untuk memastikan zona tekanan netral.



Gambar 2. 3 (a) Ilustrasi penghawaan di satu sisi (b) teknik penghawaan silang (<http://www.abec.co.uk>)

Kelebihan sistem penghawaan alami adalah rendahnya konsumsi energi operasional dan emisi gas terhadap lingkungan (Aflaki dkk, 2015). Penghawaan

alami pada bangunan dapat meningkatkan kenyamanan termal dan kualitas udara dalam ruang. Ben-david (2016) melaporkan kualitas udara ruang berpenghawaan alami cukup baik dibandingkan ruang berpenghawaan mekanis. Dari lima jenis gas dan partikel yang mempengaruhi kualitas udara, hanya satu jenis partikel yang tidak bisa disaring ketika menggunakan penghawaan alami. Penghuni bangunan bersistem penghawaan alami umumnya memiliki potensi terkena SBS (*Sick Building Syndrome*) yang lebih rendah dibandingkan penghuni bangunan bersistem penghawaan mekanis. Namun, sistem ini memiliki kelemahan karena kinerjanya sangat bergantung pada kondisi lingkungan.



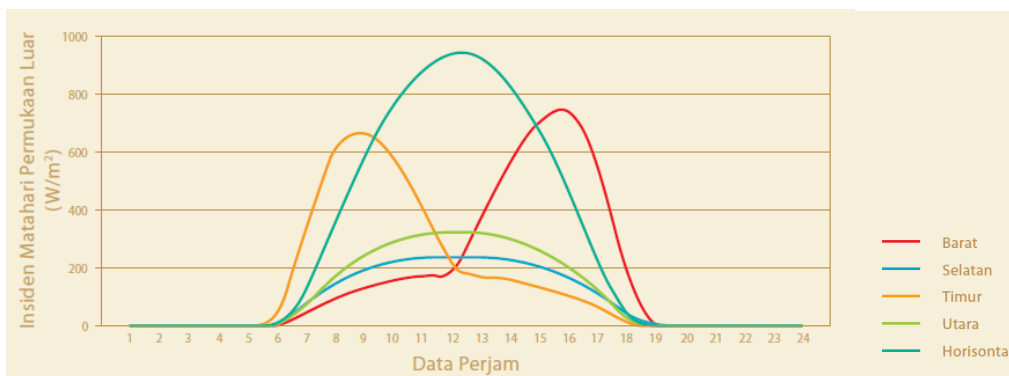
Gambar 2. 4 Ilustrasi teknik penghawaan *passive stack* (passivesolar.weebly.com)

Untuk mewujudkan penghawaan alami yang efisien, bangunan perlu dirancang memfasilitasi pergerakan udara. Secara garis besar, Priolo (1998 dalam WHO, 2009) menyatakan terdapat tiga elemen perancangan bangunan dengan sistem penghawaan alami, yaitu:

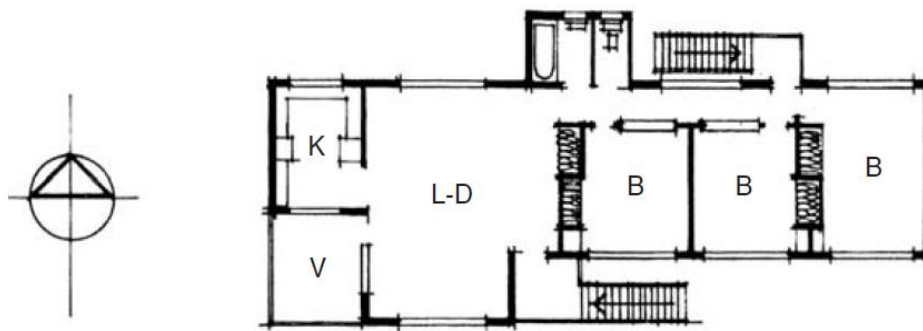
- Perancangan lahan meliputi lokasi, *layout*, orientasi bangunan, dan lanskap.
- Perancangan bangunan terkait tipologi dan fungsi bangunan, bentuk, selubung, strategi penghawaan alami, konfigurasi antar ruang, dan massa termal.
- Perancangan bukaan meliputi posisi, jenis, ukuran dan strategi kontrol bukaan.

Perancangan lahan mengintegrasikan bangunan dengan topografi dan bangunan lain di sekitarnya. Kepadatan area sekitar bangunan dan adanya vegetasi mempengaruhi laju angin. Semakin kasar permukaan, semakin besar gaya yang menghambat aliran angin sehingga kecepatan angin menurun. Orientasi bangunan juga merupakan aspek yang perlu dipertimbangkan. Gambar 2.5 menunjukkan rata-

rata radiasi matahari yang diterima permukaan bangunan di Jakarta ($5^{\circ}19' - 6^{\circ}23'$ LS 106° BT). Permukaan horizontal (atap) menerima radiasi matahari terbesar, yaitu 527 W/m^2 per hari. Dinding menghadap Barat menerima radiasi rata-rata sebesar 303 W/m^2 sementara dinding Timur sebesar 268 W/m^2 per hari. Dinding menghadap Utara dan Selatan masing-masing menerima radiasi sebesar 207 W/m^2 dan 165 W/m^2 per hari. Oleh karena itu, untuk menghindari perolehan panas, bangunan disarankan memanjang dari sisi Barat ke Timur seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2. 5 Rata-rata radiasi matahari yang diterima permukaan bangunan di Jakarta dan sekitarnya (Panduan Pengguna Bangunan Gedung Hijau Jakarta)



Gambar 2. 6 Tipikal bangunan dengan sistem penghawaan alami di iklim tropis (Szokolay, 2004: 70)

Perancangan bangunan memperhatikan tipologi dan fungsi bangunan. Bangunan ramping dengan barisan ruang tunggal (*single row*) lebih baik dibandingkan barisan ruang ganda (*double row*) dalam mengalirkan penghawaan alami. Bentuk bangunan seramping mungkin dengan sisi panjang menghadap Utara dan Selatan merupakan strategi penghindaran perolehan panas sekaligus penghawaan alami (Aflaki dkk, 2015). Secara umum, dinding yang menghadap ke

Utara dan Selatan sebaiknya lebih panjang dari dinding yang menghadap Timur dan Barat, dengan rasio 1,3 hingga 2 (Szokolay S. V., 2004). Dalam *The Green Skyscraper*, Ken Yeang memberikan referensi aspek rasio dan orientasi untuk bangunan bertingkat tinggi di 4 iklim. Pada iklim tropis lembab, Yeang menyarankan bangunan memiliki aspek rasio 1:3 dengan orientasi 5° ke Utara dari arah Timur. Bangunan di iklim tropis direkomendasikan memiliki rasio panjang dan lebar 1:3 (Riley, Cotgrave, dan Farragher, 2017).

Material bangunan yang digunakan umumnya memiliki massa termal yang rendah sehingga tidak banyak menyimpan panas. Konstruksi ringan, seperti kayu, menyimpan sedikit panas sehingga cepat dingin saat malam hari (Koenigsberger dkk, 1974). Bukaan di selubung bangunan berpenghawaan alami umumnya cukup luas dan dilengkapi peneduh. Namun, peneduh berpotensi mengurangi kecepatan angin sehingga menghambat penghawaan alami (Hildebrand, 2012). Untuk memaksimalkan laju aliran udara, ukuran *inlet* dan *outlet* perlu diperhatikan. Secara umum, ukuran *inlet* dan *outlet* yang sama besar akan menghasilkan kecepatan rata-rata angin tertinggi (Allard, 1998: 70). Peningkatan laju aliran udara dan penurunan temperatur operatif terjadi saat *inlet* yang menghadap arah datangnya angin lebih kecil dibandingkan *outlet* (Lechner, 2001). Ukuran *inlet* yang lebih kecil dari *outlet* akan meningkatkan kecepatan angin dalam ruang hingga 30%. Posisi bukaan terkait ketinggian disesuaikan dengan strategi penghawaan yang dipilih dan tujuannya, untuk mendinginkan manusia atau struktur bangunan.

2.1.5 Sistem penghawaan mekanis dan karakteristik bangunan

Sistem aktif atau sistem penghawaan mekanis diciptakan untuk mengontrol kondisi udara dalam ruang dalam keadaan iklim apapun. Untuk mendinginkan bangunan, mesin memompa panas dari dalam ruang ke penampungan panas (*heat sink*). Air, tanah, dan atmosfer dapat berfungsi sebagai penampung panas. Pemilihan metode pemindahan panas bergantung dengan tipe bangunan dan ukurannya. Terdapat empat kategori sistem pendinginan mekanis (Lechner, 2001), yaitu:

1. *Direct refrigerant system*: Sistem ini merupakan sistem yang paling sederhana karena hanya terdiri atas mesin refrigerasi dan dua kipas. Sistem ini sesuai digunakan pada ruang berukuran kecil hingga sedang.
2. *All-air system*: Pada sistem ini, udara dialirkan melewati koil evaporator dingin melalui pipa menuju ke ruangan. Dengan sistem ini, udara dapat disaring dan dikurangi kelembabannya secara efektif. Kelemahan sistem ini adalah membutuhkan pipa yang cukup besar.
3. *All-water system*: Air didinginkan oleh koil evaporator dan dialirkan ke *fan coil unit* di tiap ruang. Penyaringan dan pengurangan kelembaban dapat dilakukan meskipun tidak seefektif sistem *all-air*.
4. Kombinasi *air-water system*: Pendinginan dilakukan seperti sistem *all-water* sementara sistem *all air* berfungsi menghilangkan kelembaban dan menyaring udara.

Beberapa jenis pengkondisian udara (AC) yang umum digunakan di bangunan berukuran kecil dan menengah (Lechner, 2001):

- *Through the wall unit*: Kompresor, koil kondensor, dan satu kipas berada di sisi luar bangunan, dipisahkan oleh partisi dengan komponen AC di dalam ruang. Komponen yang berada di dalam ruang adalah koil evaporator dan kipas untuk meniupkan angin dingin.
- *Packaged system*: Satu paket AC ini dapat digunakan untuk satu bangunan kecil. Unit dapat dipasang di atas atap, di atas langit-langit, ataupun di bawah bangunan.
- *Split system*: Bangunan kecil dan medium umumnya menggunakan sistem ini. Pada sistem ini, kompresor dan koil kondensor berada di luar bangunan sementara *air handling unit* dan koil evaporator berada di dalam bangunan.
- *Ductless split system*: Sistem ini menggunakan dua jalur kecil yang menghubungkan kompresor di luar bangunan dengan mini air handling unit di dalam ruang.

Bangunan perguruan tinggi yang menjadi fokus penelitian ini bertingkat rendah hingga menengah. Sistem pengkondisian udara yang umum digunakan adalah sistem *ductless split*. Sistem aktif mampu menyediakan lingkungan termal terkontrol pada ruangan. Sistem yang dirancang dengan baik akan membuat

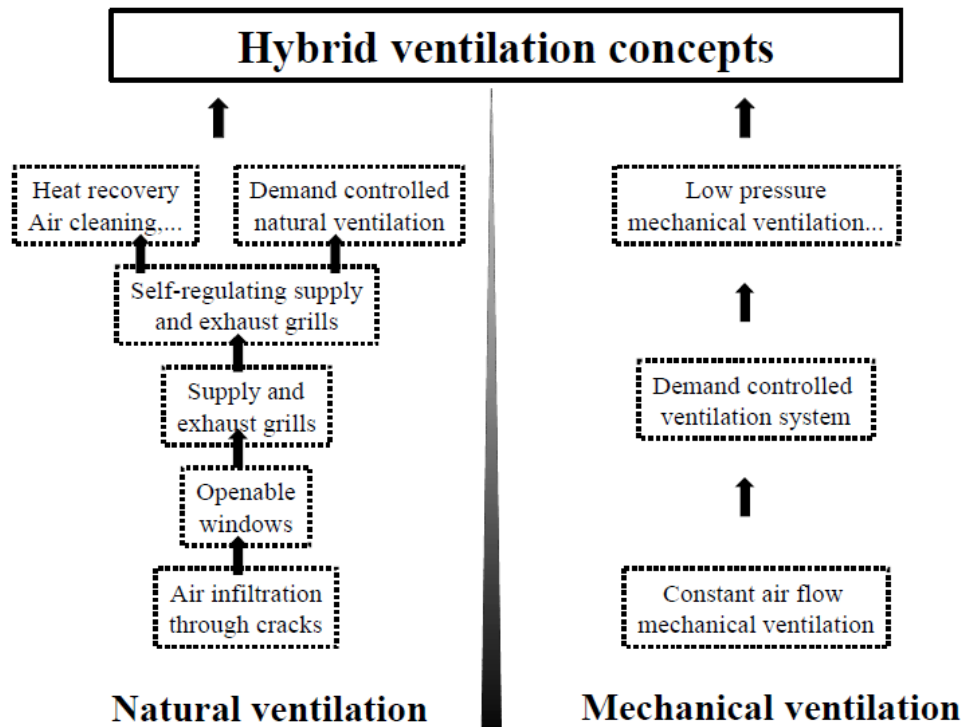
penghawaan dalam ruang baik dan tidak terpengaruh dengan kondisi iklim lingkungan. AC juga dapat menyaring partikel-partikel polutan sehingga ruangan memiliki kualitas udara yang baik. Namun, sistem ini memerlukan biaya dan konsumsi energi yang besar untuk operasional serta perawatan. Simulasi yang dilakukan Lau (2016) pada bangunan perkantoran bertingkat tinggi di Malaysia menunjukkan 45,9% dari total konsumsi energi bangunan digunakan untuk pendinginan. Bangunan dengan pengkondisian udara tanpa memasukkan udara segar berpotensi meningkatkan *Sick Building Syndrome* (Fisk, 2002).

Bila karakteristik bangunan dengan sistem penghawaan alami mengkombinasikan strategi penghindaran panas dan penghawaan alami, bangunan bersistem penghawaan mekanis fokus pada strategi penghindaran panas. Aspek perancangan lahan seperti lokasi dan bangunan sekitar tidak terlalu mempengaruhi bangunan berpenghawaan mekanis. Bentuk bangunan kompak dapat meminimalisir perpindahan panas sehingga sesuai untuk bangunan berpenghawaan mekanis. Ling dkk (2007) melaporkan bangunan kompak (aspek rasio 1:1) merupakan bentuk optimum yang menerima panas matahari dalam jumlah kecil di iklim tropis. Hal ini disebabkan bangunan kompak memiliki perbandingan luas permukaan dengan volume terkecil. Selubung bangunan berpenghawaan mekanis sebaiknya merupakan konstruksi ringan dan rapat (*tightly sealed*).

2.1.6 Sistem penghawaan hibrida dan karakteristik bangunan

Wouters dkk (1999) menyatakan pemisahan penghawaan alami dan mekanis memiliki kelemahan. Dengan bantuan teknologi, kombinasi keduanya akan menghasilkan penghawaan alami yang cerdas dan penghawaan mekanis yang efisien. Sistem penghawaan hibrida adalah sistem yang menyediakan kenyamanan lingkungan internal menggunakan penghawaan alami dan mekanis sepanjang tahun. Sistem ini mengkombinasikan dua moda sehingga disebut juga *dual mode* atau *mixed-mode ventilation* (MMV). Gambar 2.7 menunjukkan diagram konsep sistem penghawaan hibrida. Dalam sistem penghawaan hibrida, faktor alami dan mekanis dioperasikan secara bervariasi bergantung musim dan kondisi tiap harinya. Bangunan bersistem penghawaan hibrida yang dirancang dengan baik menggunakan sistem penghawaan alami selama kondisi iklim dapat diterima dan

menggunakan penghawaan mekanis hanya ketika penghawaan alami tidak dapat terjadi. Tujuan utama sistem ini adalah memaksimalkan kenyamanan termal sekaligus meminimalisir konsumsi energi.



Gambar 2. 7 Diagram konsep sistem penghawaan hibrida (Wouters dkk, 1999)

Tiga prinsip utama sistem penghawaan hibrida adalah (Santamouris dan Wouters, 2006):

- Penghawaan alami dan mekanis
Prinsip ini berdasarkan strategi kontrol antara dua sistem dimana untuk tujuan tertentu digunakan satu sistem dan sistem lain untuk tujuan lainnya. Contohnya pemanfaatan penghawaan mekanis saat ruangan digunakan dan mengandalkan penghawaan alami untuk *night cooling*.
- Penghawaan alami dengan bantuan kipas
Prinsip ini mengkombinasikan penghawaan alami dengan kipas. Kipas berfungsi membantu penghawaan alami saat faktor alam tidak dapat diandalkan.
- Penghawaan mekanis didukung perbedaan suhu udara dan angin
Penghawaan mekanis mengoptimalkan penggunaan faktor alami.

Sistem penghawaan hibrida diklasifikasikan berdasarkan bagaimana pengoperasiannya. Klasifikasi penerapan sistem penghawaan hibrida di bangunan (Salcido, dkk, 2016):

- *Concurrent*: Sistem penghawaan alami dan mekanis digunakan di saat yang bersamaan di suatu ruang (*same space, same time*). Sistem HVAC digunakan bila penghuni tidak merasa nyaman dengan kondisi dalam bangunan. Batas antara zona yang menggunakan penghawaan mekanis dan alami tidak terpisah secara fisik. Contoh penerapan sistem ini adalah di perimeter dan pusat satu ruangan memiliki sistem penghawaan yang berbeda di waktu yang sama.
- *Changeover*: Sistem penghawaan alami dan mekanis digunakan secara bergantian tergantung kondisi lingkungan luar (*same space, different times*). Durasi penggunaan bervariasi dari periode singkat (sistem bereaksi terhadap kondisi luar seperti tingkat kelembaban dan CO₂), periode medium (penggunaan AC saat siang hari dan *night ventilation*), serta periode panjang (bangunan yang jendelanya tidak dioperasikan sepanjang musim dingin).
- *Zoned*: Sistem penghawaan alami dan mekanis dioperasikan di zona yang berbeda pada satu bangunan pada waktu yang bersamaan (*different spaces, same time*). Bangunan dengan sistem ini memiliki ruang baik yang secara eksklusif berpenghawaan alami, secara eksklusif berpenghawaan mekanis, maupun kombinasi keduanya pada ruang yang sama. Misalnya ruang kantor dan area sirkulasi memiliki sistem penghawaan berbeda dan digunakan pada waktu bersamaan. Kombinasi kedua sistem tersebut dapat terjadi secara *concurrent* maupun *changeover*.

Sistem pengoperasian *concurrent* kurang sesuai diterapkan di iklim tropis lembab karena mengaktifkan AC bersamaan dengan menggunakan penghawaan alami meningkatkan konsumsi energi (infiltrasi tinggi). Sistem *changeover* lebih sesuai diterapkan pada ruang kuliah dimana sistem aktif akan bekerja ketika kondisi dalam ruang tidak nyaman atau kondisi ruang luar terlalu ekstrem. Oleh karena itu, sistem *changeover* menjadi fokus dalam studi ini. Sistem *zoned* terjadi dengan sendirinya ketika area ruang kuliah menggunakan sistem aktif sementara area servis menggunakan penghawaan alami.

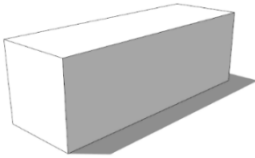
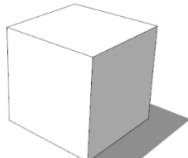
Potensi sistem penghawaan hibrida adalah penghematan energi, kenyamanan termal, serta peningkatan kesehatan. Ward dkk (2012) melaporkan penerapan strategi penghawaan hibrida di iklim moderat dapat menghemat energi hingga 42%. Meskipun tidak signifikan iklim moderat, penghematan energi bangunan berpenghawaan hibrida di iklim tropis mencapai 14%. Terkait kenyamanan termal, strategi penghawaan hibrida memberikan kesempatan penghuni bangunan untuk mengatur lingkungan termalnya sehingga kepuasan penghuni meningkat. Studi oleh Alessi dkk (2014) menunjukkan penghuni memberikan respon positif terhadap sistem MMV di negara beriklim subtropis. Sistem penghawaan hibrida dapat mengurangi permasalahan terkait kualitas udara dalam ruang (IAQ). Studi menunjukkan sistem penghawaan hibrida pada bangunan dapat meningkatkan penghematan biaya kesehatan hingga 18% dibandingkan penggunaan penghawaan mekanis (Brager dan Baker, 2009).

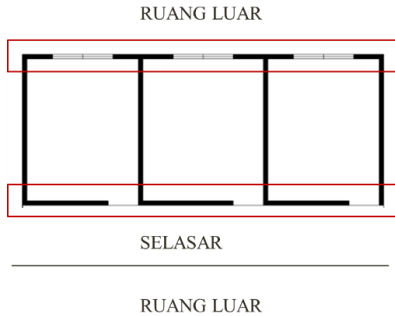
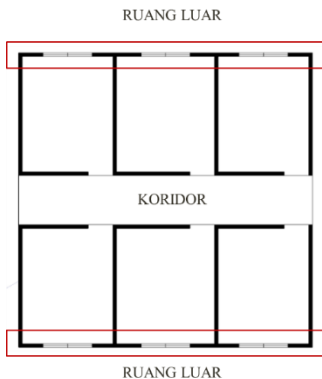
Keputusan menggunakan penghawaan hibrida berdampak pada bentuk dan selubung bangunan, kenyamanan, ventilasi, dan konsumsi energi (Wouters dkk, 1999). Penentuan prinsip penghawaan alami serta sistem mekanis apa yang akan digunakan penting untuk merancang bangunan. Sistem penghawaan hibrida memiliki karakteristik unik karena menggabungkan penghawaan alami dan mekanis. Bangunan dengan sistem penghawaan hibrida mengkombinasikan strategi penghindaran panas dan mendukung aliran udara dalam bangunan. Salcido dkk (2016) menyarankan studi lebih lanjut terhadap optimasi *layout* bangunan, peneduh dan jenis kaca, insulasi, desain fasad dan sistem HVAC yang sesuai untuk bangunan dengan sistem penghawaan hibrida.

Tabel 2.3 menunjukkan perbandingan strategi perancangan bangunan dengan sistem penghawaan alami dan mekanis di iklim tropis lembab dari berbagai sumber. Dari tabel tersebut dapat disimpulkan bahwa beberapa strategi perancangan bertolak belakang sementara beberapa lainnya saling mendukung. Pemilihan lokasi tidak terlalu menjadi masalah pada bangunan bersistem penghawaan mekanis sehingga tergolong aspek yang saling mendukung. Strategi penghindaran panas juga sejalan antara kedua strategi rancang. Strategi yang bersifat kontradiktif terkait bentuk bangunan dan orientasi, konfigurasi ruang, dan jendela khususnya luasan material transparan. Penelitian oleh Tenorio (2002)

terhadap hunian dengan sistem penghawaan hibrida menunjukkan hal yang sama. Aspek rancangan yang saling bertolak belakang antara sistem penghawaan alami dan mekanis adalah penghawaan/infiltrasi dan WWR. Tenorio melaporkan pada moda penghawaan alami, kondisi nyaman meningkat seiring peningkatan WWR. Namun WWR di atas 60% hanya menunjukkan sedikit peningkatan. Sementara pada moda penghawaan mekanis, beban pendinginan meningkat seiring pertambahan WWR. Luas jendela pada bangunan berpenghawaan hibrida disarankan tidak melebihi 50% dari luas dinding. Dalam studinya Tenorio juga menyatakan bangunan berpenghawaan alami dengan masa termal tinggi memiliki temperatur udara maksimum yang lebih rendah dari bangunan dengan masa termal rendah. Adanya ventilasi pada malam hari menghasilkan temperatur lebih nyaman pada bangunan dengan masa termal tinggi dibandingkan bangunan dengan masa termal rendah. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk menemukan strategi perancangan yang sesuai untuk bangunan bersistem penghawaan hibrida.

Tabel 2. 3 Perbandingan strategi perancangan bangunan dengan sistem penghawaan alami dan mekanis di iklim tropis lembab

Aspek rancang	Penghawaan alami	Penghawaan mekanis
Lokasi bangunan	Lokasi dan kepadatan di sekitar bangunan mempengaruhi laju angin untuk penghawaan (Lechner, 2001).	Kepadatan di sekitar bangunan tidak mempengaruhi penghawaan dalam bangunan.
Orientasi	Kompromi arah datang angin dan pergerakan matahari (Szokolay S. V., 2004).	Menghindari perolehan panas karena radiasi matahari. Sisi panjang bangunan menghadap Utara dan Selatan (Szokolay S. V., 2004).
Bentuk bangunan	Bangunan seramping mungkin dengan sisi panjang menghindari Barat dan Timur (Szokolay S. V., 2004).	Bentuk bangunan kompak dengan perbandingan luas permukaan dan volume yang kecil (Ling, Ahmad, dan Ossen, 2007).
		

Aspek rancang	Penghawaan alami	Penghawaan mekanis
Konfigurasi ruang	<p>Barisan ruang tunggal (<i>single row</i>). Tiap ruang memiliki akses ke ruang luar dari dua sisi sehingga penghawaan alami dapat terjadi.</p> 	<p>Barisan ruang ganda. Tiap ruang hanya memiliki akses ke ruang luar dari 1 sisi sehingga infiltrasi kecil.</p> 
Komposisi selubung (massif-lubang/kaca): jendela	<p>Semakin luas jendela semakin besar potensi penghawaan alami namun diikuti perolehan panas yang tinggi. Posisi, jenis, dan ukuran jendela mempengaruhi laju penghawaan dalam ruang (Lechner, 2001).</p>	<p>Meminimalisir jendela untuk mengurangi perolehan panas dan infiltrasi (<i>tightly sealed</i>).</p>
Peneduh	<p>Peneduh dapat mencegah panas matahari masuk dalam ruang namun dapat mengurangi kecepatan angin dan distribusinya (Hildebrand, 2012).</p>	<p>Peneduh berfungsi mencegah panas masuk dalam ruang (Szokolay S. V., 2004).</p>
Material	<p>Material selubung <i>lightweight</i> dengan massa termal yang rendah. Pada bangunan bertingkat rendah, atap dominan menerima panas sehingga diperlukan strategi tertentu pada atap. (Brager, Borgeson, dan Lee, 2007)</p>	<p>Material <i>lightweight</i> namun rapat (<i>tightly sealed</i>). Pada bangunan bertingkat rendah, atap dominan menerima panas sehingga diperlukan strategi tertentu pada atap.</p>

sumber: Lechner, 2001; Szokolay, 2004; Ling dkk, 2007; Brager dkk, 2007; Hildebrand, 2012

2.1.7 Pengaruh bentuk dan orientasi terhadap kinerja bangunan

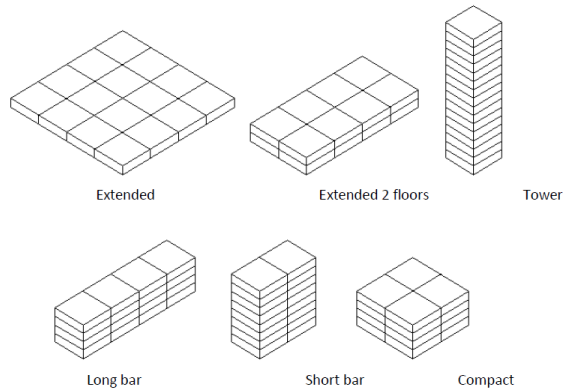
Bentuk dan orientasi bangunan mempengaruhi penerimaan panas dan kebutuhan energi. Parameter bentuk dalam penelitian ini adalah geometri bangunan

berupa bangunan berbentuk balok memanjang. Beberapa peneliti menggunakan aspek rasio sebagai indikator geometri bangunan. Aspek rasio adalah perbandingan sisi-sisi bangunan. Ling dkk (2007) mempelajari pengaruh bentuk bangunan dan orientasi terhadap radiasi matahari (*solar insolation*) yang diterima bangunan bertingkat tinggi pada konteks iklim tropis Kuala Lumpur Malaysia ($3,7^{\circ}$ LU $101,7^{\circ}$ BT). Penelitian dilakukan dengan simulasi terhadap bangunan dengan aspek rasio (W/L) 1:1, 1:1.7, dan 1:3. Orientasi bangunan yang diuji adalah Utara-Selatan, Timur-Barat, dan Barat laut-tenggara. Hasil penelitian menunjukkan bangunan dengan aspek rasio 1:1 merupakan bentuk teroptimum yang menerima total radiasi terkecil. Pada bangunan dengan aspek rasio 1:1, sisi Timur menerima radiasi panas harian terbesar, diikuti sisi Barat, Selatan, dan Utara. Bangunan dengan aspek rasio 1:1 menerima total radiasi terkecil karena memiliki perbandingan luas selubung dengan volume (s/v) terkecil. Pada iklim tropis, perbandingan luas permukaan terekspos terhadap volume bangunan (s/v) perlu dipertimbangkan (Markus dan Morris, 1980). Semakin sedikit permukaan yang menutup suatu volume, semakin kecil pengaruh eksternal terhadap bangunan.

Dalam panduan rancangan bangunan oleh DSD Amerika Serikat (2013), beberapa bentuk bangunan diuji terhadap kebutuhan energi untuk pendinginan dan pencahayaan di iklim tropis. Tiap bentuk memiliki volume bangunan yang sama. Gambar 2.8 menunjukkan bentuk bangunan yang diuji. Bangunan *tower* dengan perbandingan volume dan luas permukaan terkecil tidak menghasilkan kebutuhan energi terendah. Peneliti menyatakan bangunan memanjang dengan 3-4 lantai merupakan bentuk terbaik untuk memaksimalkan penghawaan dan pencahayaan alami. Nilai rasio luas selubung terhadap volume yang kecil tidak menjamin rendahnya energi yang dibutuhkan bangunan.

Secara umum, untuk mengurangi perolehan panas bangunan di iklim tropis disarankan memiliki aspek rasio 1,3 hingga 2 dengan sisi panjang menghadap Utara dan Selatan (Szokolay S., 2004). Yeang memberikan referensi aspek rasio dan orientasi untuk bangunan bertingkat tinggi di 4 iklim dalam *The Green Skyscraper* (1999). Untuk iklim tropis, Yeang menyarankan bangunan memiliki aspek rasio 1:3 dengan orientasi 5° ke Utara dari arah Timur. Rasio yang sama juga

direkomendasikan oleh Riley, Cotgrave, dan Farragher (2017) untuk bangunan di iklim tropis.



Gambar 2. 8 Bentuk bangunan yang dipelajari oleh DSD (DSD, 2013)

Inanici dan Demirbilek (2000) melakukan studi mengenai aspek rasio bangunan dan ukuran jendela (*south window sizes*) yang optimal untuk lima jenis iklim di Turki. Iklim tropis lembab diwakilkan oleh Antalya ($36^{\circ}53'$ LU). Aspek rasio yang diuji dari 1:1 hingga 1:2 dengan interval 0,2. Objek penelitian berupa bangunan tiga lantai. Peneliti melaporkan perubahan aspek rasio bangunan diikuti peningkatan ukuran jendela (*south window sizes*) lebih signifikan mempengaruhi total beban pendinginan dan pemanasan. Pada daerah beriklim tropis lembab, nilai aspek rasio yang optimal adalah 1:2 dengan ukuran jendela (*south window sizes*) 25%. Peneliti juga menyatakan perubahan aspek rasio bangunan dari 1 hingga 2 dengan interval 0,2 tidak menunjukkan perubahan berarti terhadap total beban pendinginan.

Untuk menghadirkan penghawaan alami, kedalaman ruang perlu diperhatikan. Agar penghawaan silang dapat terjadi dengan efektif, kedalaman ruang maksimum yang direkomendasikan adalah lima kali tinggi lantai hingga langit-langit (sekitar 15 m). Studi menunjukkan kedalaman ruang melebihi 15 m mengurangi efektivitas penghawaan alami (Mirrahimi dkk, 2016). Konsekuensinya, ruang disusun saling bersebelahan tidak berseberangan sehingga bentuk bangunan ramping (Aflaki dkk, 2015). Orientasi bangunan menjadi penting dimana jendela sebaiknya menghadap arah datang angin. Angin akan menghasilkan tekanan maksimum bila tegak lurus terhadap bidang. Sebaliknya, tekanan angin

akan berkurang sekitar 50% bila angin mengenai bangunan dengan sudut 45^0 (Aynsley dkk, 1977). Penghawaan alami terjadi dengan baik bila *inlet* menghadap ke arah datangnya angin (Aldawoud, 2016).

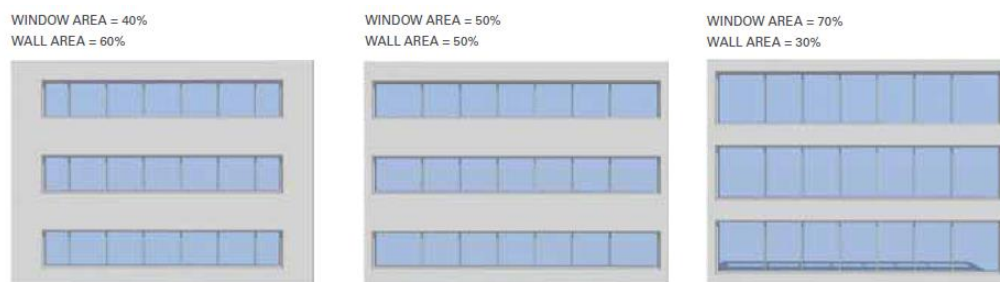
Strategi penghindaran panas dan menghadirkan penghawaan memiliki perbedaan pada aspek rancang bentuk. Untuk menghindari panas, bangunan harus memiliki bentuk yang kompak dengan aspek rasio mendekati 1:1 dan luas permukaan yang kecil. Sementara, bangunan ramping diperlukan untuk menghadirkan penghawaan alami dalam ruang. Kedalaman ruang maksimum 15 m untuk mewujudkan penghawaan silang yang efektif. Terkait orientasi, sisi panjang bangunan dan jendela menghadap Timur dan Barat perlu dihindari karena radiasi yang tinggi. Permasalahan terjadi bila di lokasi angin dominan datang dari sisi Timur atau Barat. Pada penelitian ini, bentuk dan orientasi bangunan berpenghawaan alami akan diuji untuk mengetahui kesesuaiannya terhadap penghawaan hibrida.

2.1.8 Pengaruh luas jendela terhadap kinerja termal dan energi bangunan

Panas yang diperoleh dari jendela menyumbang 25 – 28% dari total penerimaan panas bangunan (Al-Najem, 2010). Salah satu indikator yang digunakan untuk menunjukkan komposisi jendela terhadap dinding adalah *window to wall ratio* (WWR). WWR merupakan perbandingan luasan jendela dengan dinding seperti yang ditunjukkan gambar 2.9. Jendela didefinisikan sebagai elemen bangunan yang transparan. Jendela berperan memasukkan panas dalam jumlah besar. Meskipun luas jendela tetap, nilai WWR bisa berubah saat aspek rasio bangunan berubah. Perubahan luas dinding mempengaruhi nilai WWR.

Pada strategi penghindaran panas luas jendela sebaiknya dikurangi. Nilai WWR yang kecil menghasilkan beban pendinginan yang rendah sehingga penghawaan mekanis tidak membutuhkan energi yang besar. Al-Tamimi (2011) melaporkan peningkatan WWR dari 0% menjadi 50% pada ruang yang tidak berpenghawaan alami (*unventilated room*) di Malaysia meningkatkan rata-rata suhu dalam ruang dari 29°C menjadi $30,38^{\circ}\text{C}$. Sebaliknya, presentase suhu dalam ruang yang memenuhi rentang kenyamanan selama 24 jam mengalami penurunan, dari

33% menjadi 4%. Terkait energi, Cheung dkk (2005) melaporkan penurunan WWR akan mengurangi total konsumsi energi tahunan bangunan hingga 400%. Penelitian lain terhadap empat WWR (20%, 40%, 60%, 80%) di Turki menunjukkan kebutuhan energi meningkat ketika area kaca meningkat (Eskin dan Turkmen, 2008). Lam, Li, dan Yuen (1998) dalam Fairuz, Fadzil, dan Byrd (2014) menyatakan presentase kaca optimum antara 15 - 35% dari dinding. Presentase optimum menunjukkan hubungan penghematan energi karena pencahayaan alami dan konsumsi energi untuk pendinginan.



Gambar 2. 9 Ilustrasi *window to wall ratio* pada fasad bangunan (Building and Construction Authority, 2010)

Dalam strategi penghawaan alami, jendela yang luas diperlukan untuk mengalirkan angin. Yang dimaksud jendela dalam strategi ini adalah bukaan atau jendela yang dapat dioperasikan. Untuk menghadirkan penghawaan silang, bukaan (*porosity*) yang menghadap arah datang angin minimum 20% dari luas permukaan (Organization of American States, 2013). Bukaan yang besar pada bangunan berpenghawaan alami memungkinkan pergerakan angin. Namun, radiasi panas matahari yang masuk ke bangunan juga meningkat. Liping dan Hien (2007) melakukan studi pada satu unit apartemen di lantai 6 di Singapura. Peningkatan WWR dari 0,12 ke 0,24 meningkatkan presentase kenyamanan termal. Peningkatan menjadi 0,3 tidak memberikan perbaikan signifikan saat peneduh tidak digunakan. Penambahan peneduh horizontal 600 mm di atas jendela dapat meningkatkan kenyamanan termal. Hal yang sama dilaporkan Longo dkk (2011). Peneliti melakukan studi tentang pengaruh WWR pada bangunan tiga lantai berpenghawaan alami di Brazil. Penelitian menunjukkan peningkatan WWR menjadi 30% dapat meningkatkan waktu nyaman (*comfort hours*). Hal ini disebabkan jendela yang lebar berpotensi mengalirkan udara untuk menghapus panas. Namun, penulis

menekankan semakin lebar jendela berdampak pada meningkatnya perolehan radiasi panas matahari.

Selain WWR, terdapat indikator WFR (*Window to Floor Ratio*) yang menunjukkan perbandingan luas jendela dengan luas lantai. SNI 03-6572-2001 mensyaratkan ukuran jendela, bukaan, pintu, dan sarana lainnya dengan luas ventilasi tidak kurang dari 10% dari luas lantai ruangan. Tantasavasdi, Srebric, dan Chen (2001) mempelajari potensi penghawaan alami pada rumah di Bangkok, Thailand. Studi menunjukkan penghawaan alami dapat menciptakan kondisi nyaman dalam ruang selama 20% dalam setahun. Untuk mencapai kondisi nyaman, ukuran *inlet* disarankan 20% dari total luas lantai. Kecepatan angin minimum 0,04 m/s dapat meningkatkan kenyamanan termal dalam ruang. Studi lain dilakukan oleh Al-Tamimi dan Fadzil (2012) untuk mempelajari pengaruh selubung bangunan terhadap beban pendinginan di apartemen di Penang, Malaysia. Nilai WFR dari 10% hingga 80% dengan interval 10% diuji terhadap beban pendinginan (kWh/h/m².tahun). Beban pendinginan mengalami peningkatan 1,3% tiap peningkatan WFR sebesar 10%. Peningkatan WFR dari 40 menjadi 50% meningkatkan beban pendinginan sebesar 8%. Hal ini disebabkan bukaan ditambahkan pada sisi lain ruang. Beban pendinginan tahunan dapat dikurangi 2,7% dengan mengurangi WFR menjadi 10%. Nilai WFR yang tinggi mengakibatkan beban pendinginan yang tinggi pada bangunan tinggi.

Efektivitas penghawaan silang juga ditentukan ukuran jendela yang berfungsi sebagai *inlet* dan *outlet*. Aldawoud (2016) menganalisis kinerja penghawaan dan termal pada bangunan berpenghawaan alami di Dubai (25°15' LU). Objek berupa bangunan 4 lantai dengan sisi panjang menghadap Utara dan Selatan. Skenario yang diuji adalah variasi ukuran bukaan (*inlet* dan *outlet*), orientasi, dan peneduh. Hasil penelitian menunjukkan laju pertukaran udara dan suhu dalam ruang proporsional dengan ukuran bukaan. Semakin besar *inlet*, semakin banyak udara yang mengalir dalam bangunan. Peningkatan laju penghawaan silang terjadi ketika luas *inlet* dinaikkan dari 10% menjadi 50% area dinding. Secara umum, ukuran *inlet* dan *outlet* sebaiknya sama besar karena penghawaan dipengaruhi ukuran bukaan yang lebih kecil. (Lechner, 2001: 262).

Ukuran *inlet* dan *outlet* yang sama besar pada dinding sejajar akan menghasilkan kecepatan rata-rata tertinggi seperti yang ditunjukkan Tabel 2.4 (Allard, 1998:70).

Tabel 2. 4 Hubungan ukuran WWR *inlet* dan *outlet* pada dinding sejajar terhadap kecepatan angin rata-rata

Ukuran WWR		V rata-rata (%)
WWR <i>Inlet</i> 1/3	WWR <i>Outlet</i> 1/3	35
WWR <i>Inlet</i> 1/3	WWR <i>Outlet</i> 2/3	39
WWR <i>Inlet</i> 1/3	WWR <i>Outlet</i> 1	44
WWR <i>Inlet</i> 2/3	WWR <i>Outlet</i> 1/3	34
WWR <i>Inlet</i> 2/3	WWR <i>Outlet</i> 2/3	37
WWR <i>Inlet</i> 2/3	WWR <i>Outlet</i> 1	45
WWR <i>Inlet</i> 1	WWR <i>Outlet</i> 1/3	32
WWR <i>Inlet</i> 1	WWR <i>Outlet</i> 2/3	36
WWR <i>Inlet</i> 1	WWR <i>Outlet</i> 1	47

sumber: Allard, 1998:70

Gupta (2017) mempelajari rancangan jendela untuk penghawaan alami di iklim tropis. Peneliti menyatakan kecepatan angin akan meningkat bila ukuran *inlet* tetap dan *outlet* bertambah. Bila ukuran *inlet* dan *outlet* sama, kecepatan angin akan meningkat seiring peningkatan lebar bukaan. Peningkatan lebar jendela di atas 2/3 dari lebar ruang hanya memberi pengaruh kecil pada penghawaan dalam ruang. Peningkatan ketinggian jendela di atas 1,1 m memiliki pengaruh kecil terhadap pergerakan angin di zona okupansi. Kecepatan angin dalam ruang akan meningkat bila ukuran jendela ditingkatkan hingga 25% dari luas lantai. Bila lebih dari 25%, pengaruh ukuran jendela terhadap kecepatan angin tidak lagi signifikan. Selain ukuran jendela, posisi jendela juga penting diperhatikan untuk menghadirkan penghawaan alami. Posisi dan ketinggian jendela disesuaikan dengan tujuan pendinginan, manusia atau struktur.

Luasan atau dimensi jendela merupakan aspek rancang yang penting dalam strategi penghindaran panas maupun menghadirkan penghawaan alami. Definisi jendela dapat dibagi menjadi dua, jendela sebagai elemen transparan atau kaca dan jendela yang berfungsi sebagai bukaan (*porosity*, *aperture*). Dalam studi ini, semua jendela diasumsikan jendela yang dapat dioperasikan (buka/tutup) sehingga luas

bidang transparan sama dengan luas bukaan. Jendela sebagai bidang transparan mengantarkan panas sehingga perlu dipertimbangkan dalam strategi penghawaan mekanis. Sementara bukaan, lubang, maupun jendela yang dapat dioperasikan berperan penting mengalirkan angin dalam strategi penghawaan alami. Ukuran jendela yang sesuai perlu dipelajari sehingga penghawaan alami dapat terjadi namun panas yang masuk dalam bangunan tidak berlebihan.

2.2 Sintesis kajian pustaka

Penelitian ini berfokus pada sistem penghawaan hibrida yang mengkombinasikan penghawaan alami dan mekanis. Fenomena yang melatarbelakangi penelitian ini adalah peralihan bangunan pendidikan yang semula dirancang berpenghawaan alami menjadi menggunakan AC. Gambar 2.10 menunjukkan diagram landasan teori. Sistem penghawaan alami yang akan diteliti adalah yang terjadi karena aliran angin (*wind driven ventilation*) dengan teknik penghawaan silang. Dalam studinya Aflaki dkk (2015) menyatakan prinsip dan teknik ini yang paling sesuai diterapkan di iklim tropis lembab. Kombinasi sistem penghawaan alami dan mekanis menimbulkan permasalahan saat ada aspek rancang yang saling bertolak belakang. Prinsip bangunan berpenghawaan alami adalah menghindari panas dan memfasilitasi pergerakan angin untuk menghapus panas. Sementara strategi bangunan dengan sistem aktif (menggunakan AC) fokus untuk menghindari perolehan panas.

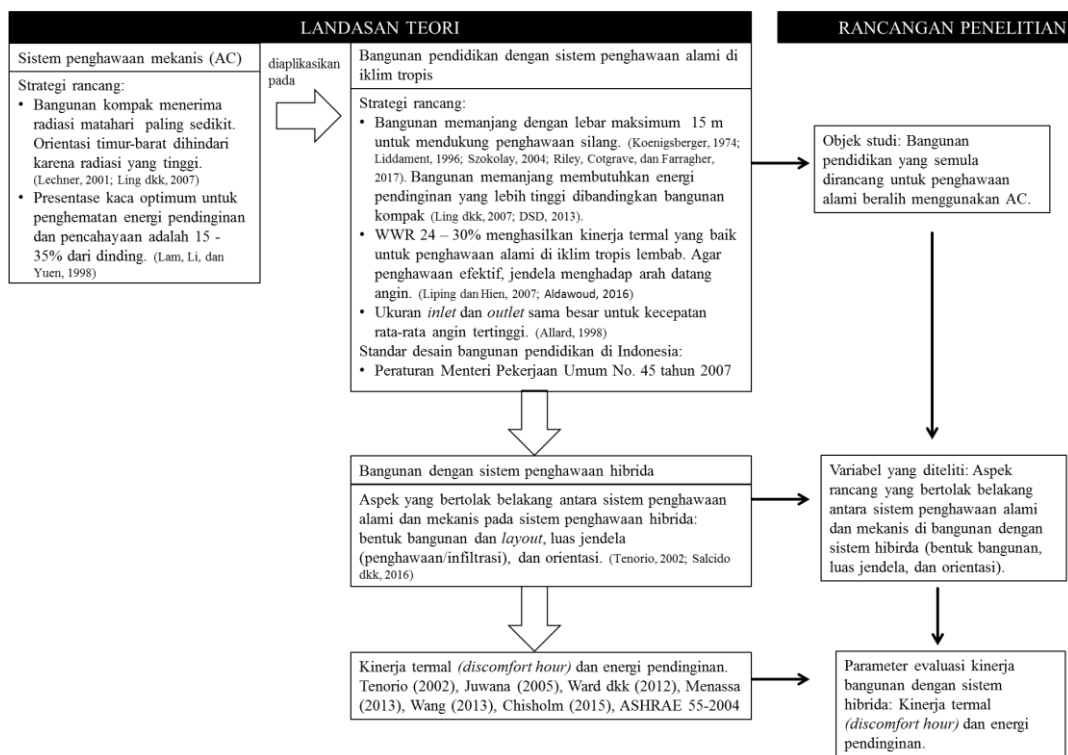
Hasil kajian literatur menunjukkan aspek rancang yang saling bertolakbelakang antara sistem penghawaan alami dan mekanis adalah bentuk bangunan, orientasi, dan luas jendela. Bentuk bangunan mempengaruhi panas yang diperoleh bangunan. Penelitian ini fokus pada bentuk geometri balok yang umumnya diterapkan di bangunan pendidikan di iklim tropis lembab. Indikator bentuk bangunan adalah perbandingan sisi panjang dan lebar bangunan atau aspek rasio. Riley, Cotgrave, dan Farragher (2017) merekomendasikan aspek rasio 1:3 untuk bangunan di iklim tropis. Di sisi lain, untuk mengurangi perolehan panas, bangunan dengan sistem penghawaan mekanis disarankan berbentuk kompak dengan aspek rasio 1:1. Bentuk kompak memiliki perbandingan luas permukaan dan volume bangunan yang rendah (Ling, Ahmad, dan Ossen, 2007). Selain bentuk,

orientasi juga mempengaruhi kinerja termal bangunan. Sisi panjang bangunan dan jendela menghadap Timur dan Barat perlu dihindari karena radiasi yang tinggi. Sementara penghawaan alami akan efektif bila bukaan menghadap ke arah datang angin (Liddament, 1996). Permasalahan terjadi bila di lokasi angin dominan datang dari sisi Timur atau Barat. Diperlukan kompromi antara pergerakan matahari dan arah angin.

Komposisi luas jendela dan dinding mempengaruhi banyaknya radiasi matahari yang masuk ke bangunan (Cheung dkk, 2005). Definisi jendela dapat dibagi menjadi dua, jendela sebagai elemen transparan dan jendela yang berfungsi sebagai bukaan (*porosity, aperture*). Pada bangunan berpenghawaan alami, peningkatan luas bukaan dapat meningkatkan kenyamanan termal karena memungkinkan terjadinya pergerakan angin (Longo dkk, 2011). Namun, radiasi panas matahari yang masuk ke bangunan juga meningkat. Akibatnya, beban pendinginan juga meningkat. Beberapa peneliti menggunakan indikator WWR (*Window to Wall Ratio*) yang menunjukkan rasio luas jendela dengan dinding. Liping dan Hien (2007) menyatakan nilai WWR optimal untuk penghawaan alami di iklim tropis lembab adalah 24%. Sementara Inanici dan Demirbilek (2000) menemukan WWR optimum 25% untuk bangunan tiga lantai di iklim tropis. Lam, Li, dan Yuen (1998) dalam Fairuz, Fadzil, dan Byrd (2014) menyatakan presentase kaca optimum antara 15 - 35% dari dinding. Presentase optimum menunjukkan hubungan penghematan energi karena pencahayaan alami dan konsumsi energi untuk pendinginan. Dalam studi ini indikator ukuran jendela yang digunakan adalah luasannya. Dengan aspek rasio berbeda, luas jendela yang sama menghasilkan WWR yang berbeda. Ukuran jendela yang sesuai untuk penghawaan hibrida yang mengkombinasikan penghawaan alami dan mekanis perlu diteliti.

Penelitian ini bertujuan menemukan konfigurasi selubung bangunan pendidikan berpenghawaan hibrida yang menghasilkan kinerja termal yang baik serta efisien terhadap energi. Kinerja termal bangunan dievaluasi berdasarkan faktor lingkungan seperti temperatur udara, kelembaban, dan MRT, serta periode ketidaknyamanan (*discomfort hours*). Rentang kondisi nyaman didasarkan pada standar ASHRAE 55-2004. Sementara efisiensi energi dievaluasi berdasarkan

energi pendinginan. Untuk optimasi, kondisi *base case* dijadikan parameter baik buruknya kinerja termal.



Gambar 2. 10 Diagram landasan teori penelitian

2.3 State of the art

Penelitian ini berada dalam lingkup penelitian arsitektur lingkungan, dengan fokus termal dan energi. Penelitian ini menawarkan konsep selubung yang efisien terhadap energi untuk bangunan pendidikan dengan sistem penghawaan hibrida di iklim tropis lembab. Dalam lingkup laboratorium, penelitian ini berkonsentrasi pada arsitektur kontemporer di dataran rendah dan kepadatan rendah di Surabaya. Tabel 2.5 menunjukkan aspek lingkungan yang diteliti adalah bidang termal dengan cakupan bangunan pendidikan dengan sistem penghawaan hibrida, kombinasi pasif dan aktif.

Studi terdahulu mengenai sistem penghawaan hibrida telah dirangkum di Tabel 2.6. Beberapa peneliti, seperti Deuble dan de Dear (2012), Alessi dkk (2014), dan Luo (2015), berkonsentrasi pada kenyamanan termal penghuni di bangunan berpenghawaan hibrida. Peneliti lainnya mempelajari strategi penghawaan hibrida yang sesuai untuk bangunan tertentu. Menassa (2013) menguji beberapa strategi

penghawaan hibrida yang sesuai untuk gedung laboratorium di Madison, Amerika. Beberapa studi ditujukan untuk melihat potensi penghematan energi dengan variabel bukaan, geometri bangunan, dan material. Evaluasi penghematan energi pada kantor bersistem penghawaan hibrida dilakukan Wang (2013). Aspek yang diteliti meliputi pengaruh area bukaan, insulasi, hingga empat jenis iklim di Amerika. Hasil penelitian menunjukkan penggunaan energi listrik dapat berkurang 6 – 91% bergantung iklim. Tenorio (2002) meneliti hunian berpenghawaan hibrida untuk mengetahui strategi apa saja yang saling bertolak belakang. Hasilnya, penghawaan/infiltrasi dan WWR merupakan aspek rancang yang bersifat kontradiktif antara sistem penghawaan alami dan mekanis. Rupp dan Ghisi (2012) mempelajari potensi penghematan listrik dengan variabel geometri dan ukuran bukaan pada bangunan yang mengintegrasikan pencahayaan alami dan penghawaan hibrida. Studi-studi sebelumnya memiliki jenis bangunan (karakteristik okupansi) serta konteks iklim yang berbeda dengan penelitian ini. Penelitian ini juga berfokus tidak hanya pada efisiensi energi, tetapi juga kinerja termal di iklim tropis lembab.

Tabel 2. 5 Posisi penelitian pada *road map* penelitian Laboratorium Sains Arsitektur dan Teknologi

No.	SPECIFICATION	SCOPE					
		A	B		C	D	E
		Settle- ment/ urban	Building l m h	Interior	Materi al & techno- logy	System/ method/ standar d	Integra tion /optima -tion
1	Thermal	p	X				
		a	X				
2	Ventilation	p					
		a					
3	Lighting	p					
		a					
4	Acoustic	p					
		a					
5	Energy	p	X				
		a					
6	Ecology						

Notes:
p = passive system; a = active system
l = low-rise building; m = middle-rise building; h = high-rise building

Tabel 2. 6 Rangkuman studi terdahulu terkait sistem penghawaan hibrida

Sumber	Jenis bangunan	Aspek yang diteliti Variabel bebas	Variabel terikat	Penerapan	Iklim
Menassa (2013)	Institusi	Strategi penghawaan (buka tutup jendela, <i>louvers</i> di atrium)	Kenyaman termal, IAQ, penghematan energi	<i>Change over</i>	Sub-tropis
Wang (2013)	Kantor	Area bukaan, insulasi	Penghematan listrik	<i>Zoned</i>	Panas dan lembab, panas dan kering, iklim <i>marine</i>
Tenorio (2002)	Rumah	Penghawaan/ infiltrasi dan WWR	Kenyamanan termal (kH), energi pendinginan	<i>Change over</i>	Tropis lembab
Deuble dan de Dear (2012), Alessi dkk (2014), dan Luo (2015)	Kantor		Kenyamanan termal penghuni pada bangunan dengan sistem hibrida		Sub-tropis
Rupp dan Ghisi (2012)	Bangunan komersial	Geometri ruang, WWR	Konsumsi energi (kWh/m ² tahun): integrasi dengan pencahayaan alami	<i>Change over</i>	Sub-tropis
Penelitian ini	Bangunan pendidikan	Aspek rasio, luas jendela, orientasi	Kinerja termal dan energi pendinginan	<i>Change over</i>	Tropis lembab

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Paradigma penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menemukan konsep konfigurasi selubung bangunan pendidikan dengan sistem penghawaan hibrida di iklim tropis lembab yang memiliki kinerja termal yang baik serta efisien terhadap energi. Sistem penghawaan hibrida yang menjadi fokus adalah kombinasi penghawaan alami dan mekanis yang digunakan bergantian dalam satu ruangan bergantung kondisi lingkungan luar. Saat suhu lingkungan melebihi batas kenyamanan, sistem penghawaan mekanis digunakan. Kinerja termal bangunan ditinjau dari durasi waktu kondisi tidak nyaman (*discomfort hours*) saat moda pasif. Efisiensi energi merujuk pada energi pendinginan yang rendah saat moda aktif. Berdasarkan tujuan penelitian, paradigma yang digunakan adalah paradigma kuantitatif positivisme. Menurut Groat dan Wang (2013), realita dalam paradigma kuantitatif positivisme bersifat objektif dimana faktor subjektivitas peneliti tidak dapat terlibat dalam proses eksperimen. Pada penelitian ini, baik variabel bebas maupun terikat bersifat objektif dan terukur. Tiap variabel memiliki indikator atau petunjuk untuk mengevaluasi variabel tersebut.

Karakteristik lain dari paradigma kuantitatif positivisme adalah menunjukkan hubungan sebab akibat. Perubahan pada variabel bebas mempengaruhi variabel terikat sehingga menunjukkan hubungan sebab-akibat. Terdapat parameter sebagai kriteria atau tolak ukur terhadap variabel terikat, kinerja termal dan beban pendinginan. Berbeda dengan paradigma post-positivisme, dalam penelitian ini manusia tidak dilibatkan sebagai objek penelitian. Penelitian murni mengandalkan hasil pengukuran yang objektif.

3.2 Metode penelitian

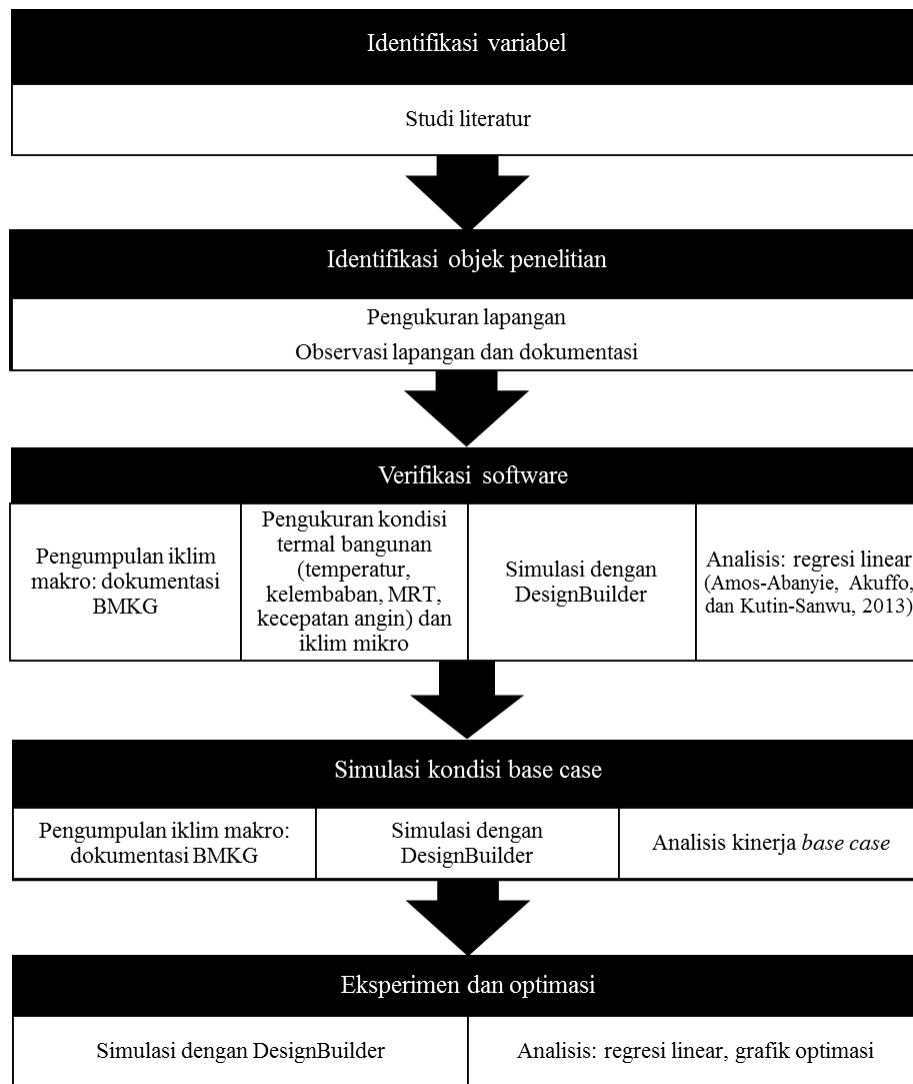
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimen menggunakan bantuan simulasi. Tujuan penggunaan metode eksperimen adalah mengetahui dampak dari satu atau lebih variabel yang spesifik terhadap fenomena

yang sedang diteliti (Groat dan Wang, 2013). Salah satu ciri-ciri metode eksperimental adalah adanya variabel yang dimanipulasi sedemikian rupa oleh peneliti, yang disebut *treatments* atau perlakuan. Pada penelitian ini, variabel yang dimanipulasi adalah variabel bebas yaitu bentuk bangunan, orientasi, dan ukuran jendela. Variabel terikat yang merupakan konsekuensi dari adanya perlakuan adalah kinerja termal bangunan dan energi pendinginan.

Taktik dalam penelitian ini dibagi sesuai tahapan penelitian seperti yang ditunjukkan gambar 3.1. Tahapan penelitian meliputi proses identifikasi, verifikasi, eksperimen dan optimasi. Tahap identifikasi yang bertujuan menemukan data awal penelitian ini dibagi menjadi dua bagian. Identifikasi variabel penelitian dilakukan dengan studi literatur sementara identifikasi sampel penelitian untuk mengumpulkan data terkait karakteristik bangunan dan okupansi dilakukan dengan observasi lapangan. Data yang dikumpulkan pada tahap identifikasi juga digunakan sebagai *input* simulasi. Tahap selanjutnya adalah verifikasi yang dilakukan dengan membandingkan apakah data di *library software* sesuai dengan keadaan sesungguhnya. Tahap selanjutnya adalah simulasi kondisi *base case* yang akan menjadi parameter. Kemudian eksperimen dan optimasi dilakukan dengan simulasi. Simulasi dilakukan dengan mereplikasi atau meniru suatu keadaan nyata guna melihat keadaan yang akan terjadi saat variabel diubah. Menurut Groat dan Wang (2013), kelebihan metode simulasi adalah dapat menjadi taktik untuk strategi penelitian lainnya, dalam hal ini taktik untuk melakukan eksperimen. Kelemahannya adalah model yang dibuat untuk simulasi mengalami simplifikasi sehingga tidak sama persis dengan objek aslinya. Seberapapun canggihnya suatu teknologi, selalu ada keterbatasan data simulasi. Untuk itu, perlu dilakukan verifikasi dan validasi terhadap hasil simulasi.

3.3 Identifikasi variabel

Penentuan variabel penelitian didasarkan pada kajian literatur untuk menjawab pertanyaan penelitian dan memenuhi tujuan penelitian. Variabel dibagi menjadi variabel bebas, terikat, dan variabel kontrol.



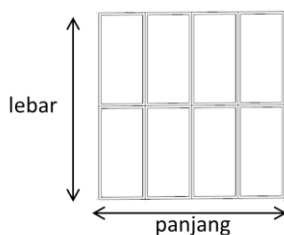
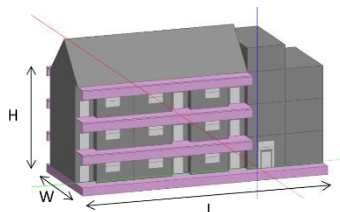
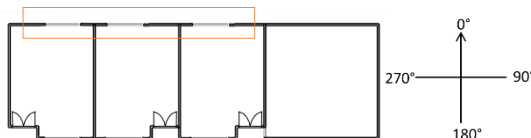
Gambar 3. 1 Taktik tiap tahapan penelitian

3.3.1 Variabel bebas dan definisi operasional

Variabel bebas merupakan variabel yang dimanipulasi sesuai dengan kondisi yang ditetapkan. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah elemen selubung bangunan pendidikan yang saling berkontradiksi antara sistem penghawaan alami dan mekanis. Variabel penelitian, indikator, dan definisi operasional ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Variabel bebas dalam penelitian ini

Variabel bebas	Indikator	Definisi operasional	Satuan
Orientasi	Sudut	Sudut antara sisi panjang bangunan (L) yang hanya terdiri atas jendela terhadap arah utara. Sudut 0° menunjukkan sisi panjang bangunan yang terdiri atas jendela menghadap utara.	°
Bentuk bangunan	Aspek rasio	Aspek rasio (L/W) adalah perbandingan sisi panjang bangunan (L) dengan sisi lebar (W), sementara ketinggian bangunan (H) konstan. Sisi panjang bangunan (L) adalah sisi yang terdiri atas deretan jendela kelas. Sementara sisi lebar (W) merupakan sisi tanpa jendela pada ruang kelas.	meter : meter
Ukuran jendela	Luas jendela	Luas jendela adalah panjang x lebar jendela, termasuk kusen. Dalam studi ini, luas kaca sama dengan luas bukaan karena semua jendela diasumsikan jendela kaca operasional (dapat dibuka-tutup).	m ²



3.3.2 Variabel terikat dan definisi operasional

Variabel terikat merupakan variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas. Variabel terikat dalam penelitian ini ditunjukkan pada tabel 3.2. Kinerja termal bangunan dievaluasi dengan durasi waktu tidak nyaman (*discomfort hours*). Parameter kenyamanan termal adalah ASHRAE 55-2004 antara temperatur operatif dan kelembaban absolut seperti yang ditunjukkan gambar 2.1 pada BAB II.

Discomfort hours dihitung hanya pada waktu operasional ruang kelas, Senin – Jumat pukul 08.00 – 16.00. Parameter untuk mengevaluasi efisiensi energi adalah energi pendinginan. Kondisi *base case* menjadi standar efisiensi energi dan peningkatan kondisi termal.

Tabel 3. 2 Variabel terikat dalam penelitian ini

Variabel terikat	Indikator	Parameter	Definisi operasional	Satuan
Kinerja termal	<i>Discomfort hour</i>	Kondisi nyaman menurut ASHRAE 55-2004. Kondisi <i>base case</i> .	<i>Discomfort</i> merupakan presentase waktu di luar kondisi nyaman (jumlah jam nyaman saat waktu operasional dibandingkan total jam operasional). <i>Discomfort hour</i> merupakan kombinasi pengaruh temperatur udara, kelembaban, kecepatan angin, dan MRT.	%
Energi pendinginan	Kebutuhan energi pendinginan	Kondisi <i>base case</i> .	Energi pendinginan merupakan akumulasi beban pendinginan sensibel dan laten.	kWh

3.3.3 Variabel kontrol

Variabel kontrol dalam penelitian ini dibagi menjadi karakteristik fisik bangunan perguruan tinggi dan okupansinya (Tabel 3.3). Yang termasuk karakteristik fisik adalah letak posisi dan ketinggian jendela, material dinding, kaca, lantai, dan atap, serta kondisi di luar bangunan. Data terkait tingkat dan pola okupansi ditetapkan untuk mengontrol beban panas internal. Variabel kontrol ditetapkan berdasarkan data observasi terhadap ruang kelas di FTSP dan FADP ITS. *Setting* waktu eksperimen juga merupakan variabel kontrol ditunjukkan pada tabel 3.4. Model eksperimen disimulasikan saat moda pasif (penghawaan alami) dan moda aktif (menggunakan AC) di bulan terdingin dan terpanas.

Tabel 3. 3 Variabel kontrol

Variabel kontrol	Sub-variabel	Keterangan
Karakteristik fisik ruang kelas	Volume bangunan	Volume semua model eksperimen sama. Perubahan hanya terjadi pada rasio sisi panjang dan lebar (H/W).
	Jenis, letak dan posisi jendela	Jenis jendela yang digunakan adalah tipe <i>awning</i> yang dapat dibuka hingga 75% (Hildebrand, 2012). Posisi jendela saling berseberangan sesuai hasil observasi lapangan.
	Material bangunan	Material bangunan tiap model sama, disesuaikan dengan hasil observasi.
Jenis sistem penghawaan hibrida		Fokus penelitian ini adalah tipe <i>changeover</i> , penghawaan alami dan mekanis digunakan secara bergantian bergantung kondisi lingkungan luar. Untuk mengetahui kinerja bangunan pada kedua kondisi, objek disimulasikan menggunakan penghawaan alami secara penuh dan menggunakan AC secara penuh.
Okupansi	Tingkat okupansi	Saat eksperimen, kelas diasumsikan terisi penuh.
	Pola okupansi	Kelas digunakan selama hari Senin – Jumat, sesuai jadwal perkuliahan pukul 08.00 hingga 16.00 (kecuali saat ISHOMA, pukul 12.00 – 13.00).

Tabel 3. 4 *Setting* waktu eksperimen

Waktu eksperimen	Moda penghawaan	Keterangan
Bulan terdingin: Januari (<i>weekdays</i> 08.00 – 16.00)	Pasif	Penghawaan alami (jendela terbuka)
	Aktif	AC aktif (jendela tertutup)
Bulan terpanas: Oktober (<i>weekdays</i> 08.00 – 16.00)	Pasif	Penghawaan alami (jendela terbuka)
	Aktif	AC aktif (jendela tertutup)

3.4 Objek penelitian

Populasi penelitian adalah wilayah generalisasi yang terdiri atas objek/subjek yang memiliki kualitas dan karakteristik tertentu yang ditetapkan oleh

peneliti untuk dipelajari dan kemudian ditarik kesimpulannya (Sugiyono, 2011). Populasi dalam penelitian ini adalah bangunan perguruan tinggi pemerintah yang berada di iklim tropis lembab. Bangunan perguruan tinggi pemerintah dipilih karena bangunan tersebut umumnya dirancang berpenghawaan alami namun beralih menggunakan AC. Fokus penelitian adalah bangunan perkuliahan yang terdiri atas ruang-ruang kelas. Berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 45 tahun 2007, bangunan perguruan tinggi memiliki beberapa persyaratan seperti yang ditunjukkan tabel 3.5.

Tabel 3. 5 Persyaratan bangunan perguruan tinggi

Aspek	Keterangan
Jarak antar bangunan	minimum 3 m
Ketinggian bangunan	maksimum 8 lantai dengan ketinggian plafon minimum 2,8 m
Material dinding	bata, batako diplester dicat atau dilapisi keramik, kaca, atau panil beton ringan
Material penutup atap	genteng keramik atau aluminium gelombang dicat
Material plafon	gypsum atau kayu lapis dicat
Material lantai	marmer lokal, keramik, vinil, atau kayu

sumber: Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 45 tahun 2007

Bangunan perkuliahan di perguruan tinggi pemerintah di iklim tropis lembab secara umum memiliki karakteristik bangunan yang sama sehingga dapat dilakukan generalisasi. Sampel merupakan bagian dari populasi yang akan diteliti. Dalam studi ini, prosedur pemilihan sampel adalah *non-probability sampling*, tepatnya *purposive sampling*. Sampel diambil berdasarkan keputusan peneliti dengan pertimbangan tertentu (Sugiyono, 2011). Tabel 3.6 menunjukkan kriteria pemilihan sampel dalam penelitian ini. Bangunan perkuliahan di Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan (FTSP) dan Fakultas Arsitektur dan Perancangan (FADP) Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dipilih sebagai sampel penelitian (Gambar 3.2). Bangunan yang menjadi sampel penelitian diantaranya bangunan perkuliahan Teknik Sipil, Teknik Lingkungan, Arsitektur, Geomatika, PWK, dan Desain Produk. Salah satu bangunan akan dipilih sebagai objek verifikasi sekaligus *base case*.



Gambar 3. 2 Lokasi penelitian FTSP ITS (googlemap)

Sampel dipilih karena mampu mewakili populasi bangunan perguruan tinggi di iklim tropis lembab. Selain itu, pemilihan objek studi didasarkan pertimbangan ITS merupakan salah satu perguruan tinggi di daerah beriklim tropis lembab dengan konsumsi energi untuk AC yang besar. Berdasarkan Laporan Tahunan ITS 2015, konsumsi energi terbesar di ITS disebabkan pemakaian AC, sebesar 65%. Ketidaksesuaian rancangan ruang dengan penggunaan AC mengakibatkan besarnya konsumsi energi.

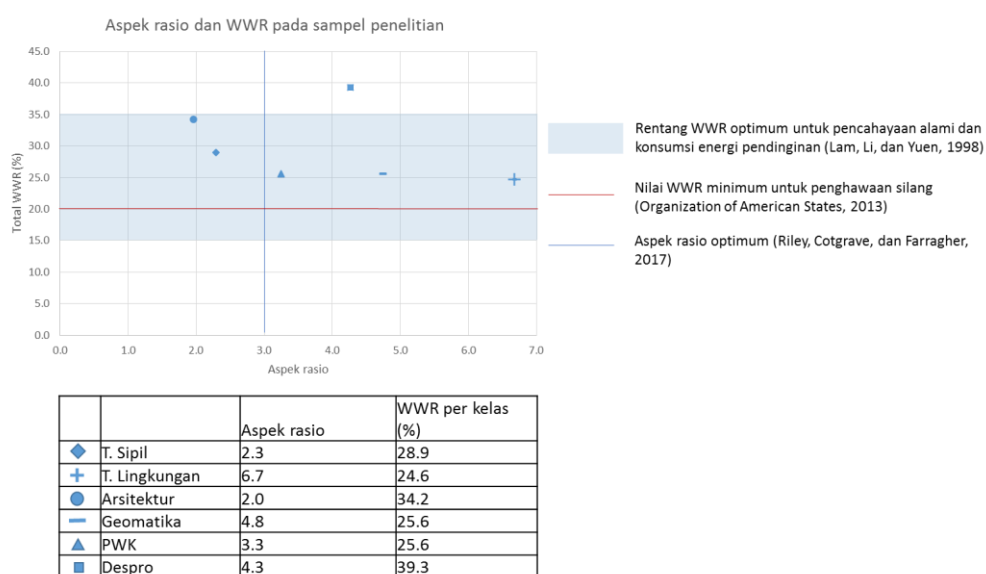
Tabel 3. 6 Kriteria pemilihan sampel penelitian

Kriteria pemilihan sampel		Keterangan
Bentuk bangunan		Bangunan bertingkat rendah hingga menengah (tidak lebih dari 8 lantai) dengan <i>layout</i> barisan ruang tunggal (<i>single row</i>).
Fungsi bangunan		Bangunan perkuliahan yang terdiri atas ruang kelas.
Kepadatan sekitar	lingkungan	Mewakili bangunan dengan kepadatan rendah.
Teknik sistem penghawaan alami		Teknik penghawaan silang (<i>cross ventilation</i>).
Jenis sistem penghawaan mekanis		Sistem AC <i>ductless split</i> .

Pengumpulan data karakteristik objek penelitian dilakukan dengan observasi. Gambar 3.3 menunjukkan kondisi sampel penelitian. Aspek rasio optimum untuk penghawaan alami adalah 3 menurut Riley, Cotgrave, dan Farragher (2017). Nilai WWR optimum untuk penghawaan silang adalah 20% (Organization of American States, 2013) sementara WWR optimum untuk pencahayaan alami dan energi pendinginan adalah 15 – 35% (Lam, Li, dan Yuen, 1998). Berdasarkan grafik, bangunan Arsitektur dan Teknik Sipil memiliki aspek rasio di bawah nilai optimum. Namun keduanya memiliki WWR yang memenuhi kondisi optimum. PWK, Geomatika, dan Teknik Lingkungan memiliki aspek rasio melebihi nilai optimum dan WWR berada di rentang optimum. Hanya Despro yang memiliki WWR melebihi nilai optimum. Sampel penelitian menunjukkan variasi rancangan bangunan pendidikan berpenghawaan alami di iklim tropis. Aspek rasio bervariasi dari 2 hingga 6,7 sementara nilai WWR tiap ruang antara 24,6% hingga 39,3%. Kondisi sampel penelitian akan menjadi acuan dalam eksperimen.

3.5 Verifikasi

Untuk mengetahui realibilitas hasil simulasi, dilakukan verifikasi dengan membandingkan hasil pengukuran lapangan dan simulasi. Verifikasi juga bertujuan membandingkan *input* data iklim dengan iklim mikro serta membandingkan apakah data di *library software* sesuai dengan keadaan sesungguhnya.



Gambar 3. 3 Aspek rasio dan WWR pada sampel penelitian

3.5.1 DesignBuilder

Simulasi kinerja termal bangunan dan beban pendinginan dilakukan dengan DesignBuilder 5.0 oleh DesignBuilder Software Limited. DesignBuilder merupakan *software* untuk memeriksa kinerja bangunan dan lingkungan yang dapat digunakan secara efektif dalam berbagai tahapan proses perancangan. DesignBuilder dapat digunakan untuk memeriksa konsumsi energi, kinerja termal hingga pencahayaan alami pada bangunan. Tabel 3.7 menunjukkan fitur yang dimiliki DesignBuilder.

Tabel 3. 7 Fitur yang dimiliki DesignBuilder

Design Builder	
Kelebihan	<ul style="list-style-type: none">▪ Analisis kinerja bangunan mulai dari termal, pencahayaan hingga energi.▪ Visualisasi model dan tapak.▪ Analisis per zona dapat dilakukan.▪ Kinerja energi bangunan menggunakan EnergyPlus.▪ Output berupa kinerja tahunan (<i>annual</i>), bulanan, harian, hingga per jam.▪ Output meliputi konsumsi energi bangunan, perpindahan panas (selubung dan ventilasi), panas internal, kenyamanan termal (<i>discomfort hour</i>, faktor iklim seperti temperatur udara, kelembaban relatif, MRT, temperatur operatif), produksi CO₂, dan perancangan HVAC.
Kelemahan	<ul style="list-style-type: none">▪ Tidak memiliki <i>output</i> kecepatan angin. Untuk mengetahui kecepatan angin dan distribusi tekanan perlu dilakukan simulasi lanjutan dengan CFD di DesignBuilder.

sumber: DesignBuilder user manual, 2009

Output kinerja termal hasil simulasi DesignBuilder diantaranya temperatur udara dalam ruang, kelembaban, MRT, temperatur operatif, dan *discomfort hours*. Perhitungan *discomfort hours* oleh *software* ini didasarkan pada ASHRAE 55-2004. DesignBuilder juga dapat menghitung beban pendinginan. Beban pendinginan menunjukkan kapasitas alat pendingin mekanis untuk memenuhi kenyamanan termal. Perhitungan dilakukan dengan metode *periodic steady state*, meliputi penerimaan panas matahari melalui jendela dan ventilasi, panas internal dari penghuni, lampu, dan peralatan lain, serta perpindahan panas secara konduksi dan konveksi antar zona yang berbeda temperatur. *Steady state* merupakan kondisi

dimana keadaan dalam dan luar ruang konstan tidak berubah. Perhitungan dalam kondisi *steady state* ditujukan untuk menentukan laju maksimum penerimaan atau pelepasan panas.

Beberapa peneliti menggunakan DesignBuilder dalam studinya. DesignBuilder digunakan Andarini (2013) untuk menemukan skenario penghematan energi yang sesuai untuk perkantoran di Jakarta. Aldawoud (2016) menggunakan *software* ini untuk memeriksa kebutuhan energi dan kinerja peneduh pada bangunan berpenghawaan alami di Dubai. Daemei, Limaki, dan Safari (2016) memeriksa kinerja bangunan berpenghawaan alami dengan DesignBuilder dan CFD. Verifikasi terhadap *software* ini pernah dilakukan Wasilowski dan Reinhart (2009). Peneliti membandingkan kondisi sesungguhnya dengan hasil simulasi menggunakan analisis statistik MBE (*Mean Bias Error*) dan RMSE (*Root Mean Square Errors*). Perbedaan konsumsi listrik tahunan hasil simulasi dan pengukuran adalah 18% hingga 0,2%. Perbedaan diakibatkan *input* data seperti jadwal okupansi yang berbeda dari kondisi nyata. Liang dkk (2017) juga memverifikasi DesignBuilder dengan MBE dan RMSE. Perbedaan hasil pengukuran temperatur dalam ruang dengan hasil simulasi adalah 0,56%. Sementara MBE total konsumsi energi +2,12% dan RMSE sebesar 7,14%. Kondisi tersebut tergolong rentang yang diterima. Reliabilitas DesignBuilder terhadap penelitian ini perlu diverifikasi dengan membandingkan hasil simulasi dengan pengukuran lapangan.

3.5.2 Objek verifikasi dan *input* simulasi

Objek yang dipilih sebagai *base case* sekaligus objek verifikasi adalah gedung B di jurusan Perancangan Wilayah dan Kota (PWK) FADP ITS seperti yang ditunjukkan gambar 3.4. Objek dipilih karena mewakili populasi penelitian dimana gedung B merupakan bangunan perkuliahan yang terdiri atas ruang kelas dan ruang seminar yang memiliki karakter okupansi yang sama dengan ruang kelas. Gedung B memiliki karakter bangunan berpenghawaan alami, seperti memiliki bukaan lebar dan lubang angin serta bentuk bangunan yang ramping, namun beralih menggunakan AC. Tabel 3.8 menunjukkan karakteristik fisik bangunan sementara Tabel 3.9 menunjukkan properti termal material yang digunakan sebagai *input* simulasi. Tabel 3.10 menunjukkan *input* simulasi terkait sumber panas internal.

Penyederhanaan pada model simulasi diuraikan di Tabel 3.11. Gambar 3.5 menunjukkan model simulasi.



Gambar 3. 4 Lokasi (kiri) dan tampak gedung B PWK (kanan)

Tabel 3. 8 Karakteristik fisik gedung B PWK

Jumlah lantai	3 lantai (+ 1 lantai gudang)
Aspek rasio	3,25 : 1
Tinggi plafon	3,8 m
Luas area servis (selain ruang kelas) per lantai	9,6 m x 9,6 m
Luas ruang kelas kecil	7,2 m x 9,6 m
Luas jendela <i>operable</i> (ruang kelas kecil)	10,7 m ²
WWR jendela <i>operable</i> (per kelas)	16,6 %
Luas jendela mati (ruang kelas kecil)	3,7 m ²
Total WWR (per kelas)	25,6 %
Peneduh	<i>Horizontal louvers (70 cm)</i>

sumber: Data Pusat Perancangan Fisik ITS

Tabel 3. 9 Properti termal material bangunan untuk *input* simulasi

Material	U-value (W/m² K)
Atap	1,728
<i>Clay tile 0,025 m + roofing felt 0,005 m</i>	
Dinding	5,227
<i>Cement/plaster/mortar 0,015 m + brick burned 0,27 m + cement/plaster/mortar 0,015 m</i>	
Jendela	5,778
<i>Single 6 mm glass</i>	
<i>Aluminium frame</i>	5,881
Pintu	4,762
<i>Plywood (lightweight)</i>	

Material	U-value (W/m ² K)
Lantai <i>Ceramic glazed</i>	2,929
Peneduh <i>Aluminium</i>	5,881

sumber: DesignBuilder

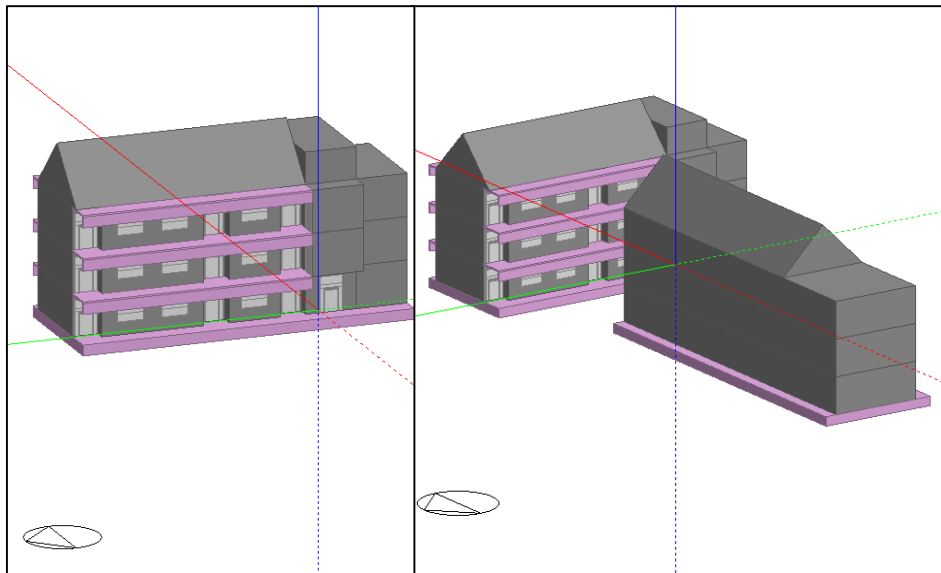
Tabel 3. 10 *Input* simulasi terkait sumber panas internal

	Input simulasi	Keterangan
Okupansi	0,5523 orang/m ²	Untuk kapasitas 35 orang per kelas.
Metabolic	<i>Light office work</i> (120 W/orang) dengan factor 0,9 (gabungan pria-wanita)	
Clothing	0,5	
Lighting	5 W/m ² – 100 Lux	Sesuai rekomendasi Architectural Lighting Design (2002) dan SNI 03-6197 2011.
Cooling setpoint	23°C	Sesuai <i>setting</i> saat pengukuran.

Tabel 3. 11 Penyederhanaan pada model simulasi

	Eksisting	Penyederhanaan pada model simulasi	Argumentasi
Lingkungan sekitar	Terdapat pohon di sekitar.	Pohon dihilangkan.	Pohon tidak membayangi bangunan sehingga tidak mempengaruhi kinerja termal bangunan.
Area servis	Terdapat pembagian ruang dan jendela pada area servis.	Area servis tidak disekat dan jendela dihilangkan.	Penelitian berkonsentrasi pada ruang kelas.
Railing	Terdapat <i>railing</i> di sepanjang selasar.	<i>Railing</i> dihilangkan.	<i>Railing</i> tidak massif (jarang-jarang) sehingga tidak banyak mempengaruhi perpindahan panas.

	Eksisting	Penyederhanaan pada model simulasi	Argumentasi
Interior	Terdapat perabotan meja-kursi.	Perabotan dihilangkan.	
Jendela	Kisi-kisi pada jendela ditutup <i>fiber</i> . 	Kisi-kisi pada jendela digambarkan sebagai jendela mati.	Lubang angin yang ditutupi hanya berfungsi memasukkan cahaya seperti jendela mati. Transmisi panas dan cahaya disesuaikan dengan eksisting.
Peneduh	Peneduh berupa <i>horizontal louver</i> . 	Peneduh berbentuk masif, bukan <i>louver</i> . 	Material peneduh di simulasi sama dengan eksisting. Kisi-kisi pada peneduh tidak terlalu mempengaruhi perpindahan panas.



Gambar 3. 5 Model simulasi di DesignBuilder (kiri), dengan bangunan di sekitarnya (kanan)

Tabel 3.12 menunjukkan pola okupansi penghuni ruang serta penggunaan lampu dan penghawaan alami selama pengukuran yang akan menjadi *input* simulasi. Saat pengukuran di ruang berpenghawaan alami, kondisi ruang kosong. Lampu juga dalam kondisi mati. Jendela yang berada di ketinggian manusia dibuka sementara jendela yang lebih tinggi dibiarkan tertutup. Sementara tabel 3.13 menunjukkan *input* pola okupansi penghuni ruang serta penggunaan lampu dan AC selama pengukuran di ruang berpenghawaan mekanis. Saat pengukuran, kelas digunakan mulai pukul 08.00 hingga siang hari sekitar pukul 12.00. Dari hasil observasi, di atas pukul 12.00 kondisi kelas cenderung kosong. Lampu dinyalakan selama kuliah berlangsung. Namun, karena menggunakan proyektor, tidak semua lampu dinyalakan. Di luar jam kuliah, lampu dimatikan. AC dinyalakan sejak pagi, sekitar pukul 08:00 hingga pukul 16:00 meskipun tidak ada aktivitas dalam ruang.

Tabel 3. 12 *Input* pola okupansi serta penggunaan lampu dan AC selama pengukuran

	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
Orang	-----	-----	-----	-----	0-----	-----	-----	-----	-----
Lampu	-----	-----	-----	-----	0-----	-----	-----	-----	-----
NV	-----	-----	-----	-----	0,75-----	-----	-----	-----	-----

Tabel 3. 13 *Input* pola okupansi serta penggunaan lampu dan AC selama pengukuran

	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
Orang	-----	-----	0,75-----	-----	-----	-----	-----	0,1-----	-----
Lampu	-----	-----	0,5-----	-----	-----	-----	-----	0-----	-----
AC	-----	-----	-----	-----	1-----	-----	-----	-----	-----

3.5.3 Pengukuran lapangan

Pengukuran lapangan dilakukan untuk mengetahui kondisi termal bangunan dengan instrumen yang ditunjukkan pada tabel 3.14. Sensor pengukuran suhu udara diletakkan dalam zona okupansi atau lokasi dimana penghuni beraktivitas (ASHRAE 55-2004). Bila zona okupansi tidak terdefinisi, sensor dapat diletakkan

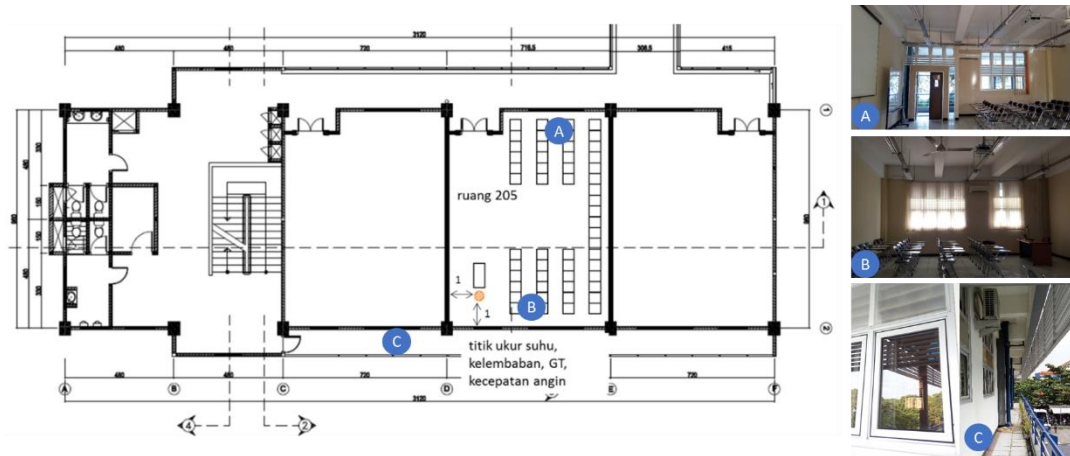
di tengah ruang atau 1 m dari titik tengah tiap dinding atau jendela. Secara umum, sensor sebaiknya diletakkan dengan jarak minimum 0,5 m dari dinding. Perletakkan sensor di dekat permukaan terlalu panas atau dingin perlu dihindari. Aspek lainnya yang dipertimbangkan dalam menentukan titik ukur adalah kepraktisan dan tidak mengganggu aktivitas dalam bangunan. Ketinggian sensor disesuaikan dengan aktivitas penghuni. Untuk posisi duduk, pengukuran kondisi termal dapat dilakukan dengan ketinggian 0,1, 0,6, 1,1 m. Pada studi ini sensor diposisikan pada ketinggian 1,1 m. Posisi sensor pada pengukuran lapangan ditunjukkan gambar 3.6 hingga gambar 3.8.

Tabel 3. 14 Instrumen pengukuran kondisi termal bangunan

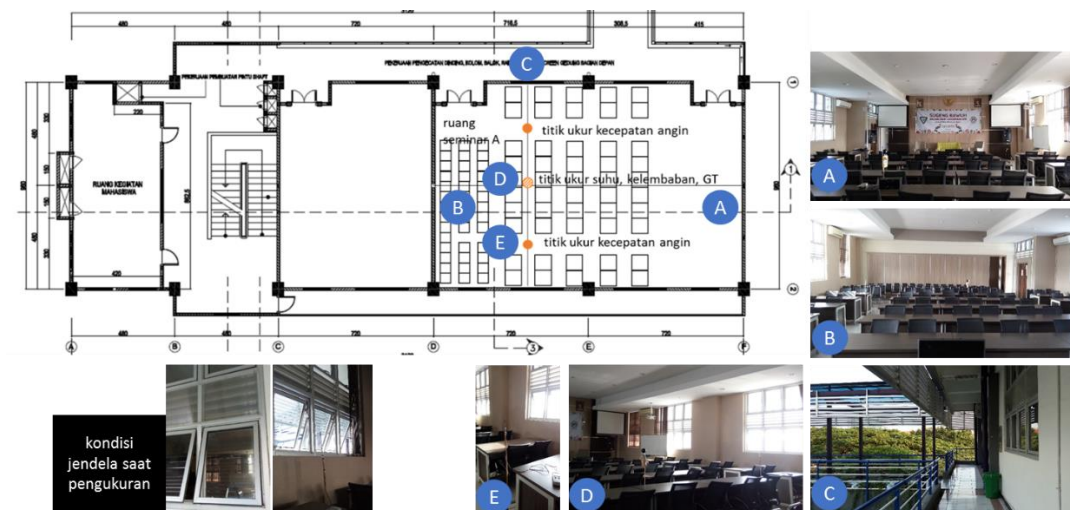
Instrumen	Fungsi	Range	Resolusi	Akurasi
Heat Index WBGT Meter	Mengukur suhu udara	0 – 50 °C	0,1 °C	$\pm 0,8$ °C (15 – 40 °C)
WBGT-2010SD (d=75 mm)	Mengukur <i>globe temperature</i>	0 – 80 °C	0,1 °C	$\pm 0,6$ °C (15 – 40 °C)
	Mengukur kelembaban	5 – 95% RH	0,1% RH	$\geq 70\%$ RH : 3% <i>reading</i> + 1% RH $< 70\%$ RH : $\pm 3\%$ RH
Hot-wire Anemometer AM-4234 SD	Mengukur suhu udara	0 – 50 °C	0,1 °C	$\pm 0,8$ °C
	Mengukur kelembaban	5 – 95% RH	0,1% RH	$\geq 70\%$ RH : 3% <i>reading</i> + 1% RH $< 70\%$ RH : $\pm 3\%$ RH
	Mengukur kecepatan angin	0,2 – 5 m/s 5,1 – 35 m/s	0,01 m/s 0,1 m/s	$\pm (5\% + a)$ <i>reading</i> $a = 0,1$ m/s
Hot-wire Anemometer YK 2005	Mengukur kecepatan angin	0,2 – 20 m/s	0,1 m/s	$\pm (5\% + a)$ <i>reading</i> $a = 0,1$ m/s

Perekaman temperatur udara dapat dilakukan dengan rapat atau renggang. Perekaman tiap 5 menit atau kurang dalam minimal 2 jam direkomendasikan ASHRAE 55-2004 untuk melihat siklus temperatur. Sementara Appah-Dankyi dan Christian (2012) melakukan pengukuran dengan interval 1 jam selama seminggu

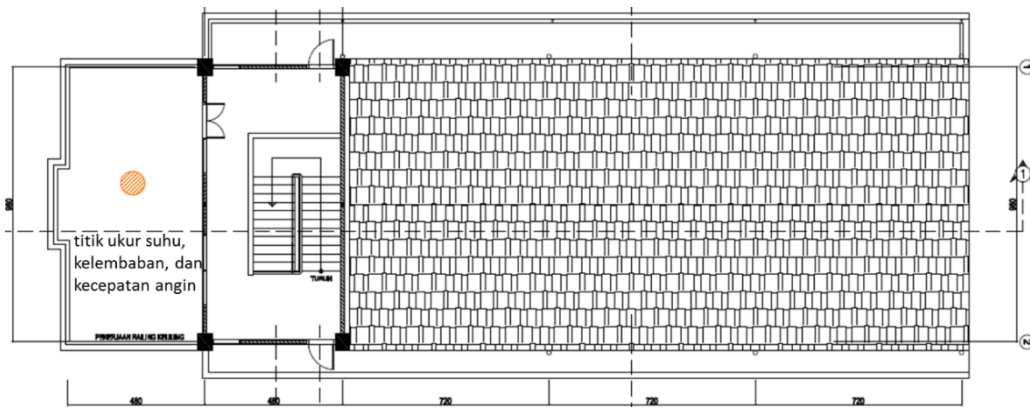
untuk meneliti kenyamanan termal di sekolah. Dalam studi ini, suhu udara direkam selama waktu okupansi ruang kelas (pukul 08.00 – 16.00) dengan interval 30 menit. Pengukuran dilakukan selama tiga hari berturut-turut, 19-21 Februari 2018. Untuk verifikasi, pengukuran dilakukan pada kondisi ruang menggunakan penghawaan alami (Ruang Seminar A) maupun menggunakan AC (Ruang 205 A).



Gambar 3. 6 Posisi titik ukur di ruang kelas 205-A (Pusat Perancangan Fisik ITS)



Gambar 3. 7 Titik ukur pada ruang seminar A (Pusat Perancangan Fisik ITS)



Gambar 3. 8 Titik ukur *outdoor* di lantai 4 gedung A PWK ITS (Pusat Perancangan Fisik ITS)

3.5.4 Metode analisis hasil verifikasi

Verifikasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan pengukuran lapangan. Kedua data dapat dipresentasikan dalam grafik untuk melihat polanya. Terdapat beberapa indeks yang digunakan untuk mengukur ketidakpastian di antaranya *Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error* (CV (RMSE)) dan regresi linear (r^2). CV(RMSE) mengukur variasi eror antara nilai yang diukur dan hasil simulasi.

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{m}} \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n-1} \times 100(\%) \quad (3.1)$$

dimana \bar{m} adalah rata-rata hasil pengukuran, m_i adalah hasil pengukuran sementara s_i adalah hasil simulasi, dan n adalah jumlah data. Metode ini pernah digunakan Wasilowski dan Reinhart (2009) serta Liang dkk (2017) untuk memverifikasi hasil simulasi DesignBuilder. Ruiz dan Bandera (2017) merangkum beberapa standar yang ditetapkan ASHRAE, FEMP (*Federal Energy Measurement*), dan IPVMP (*International Performance Measurement and Verification Protocol*) seperti yang ditunjukkan tabel 3.15.

R^2 mengindikasikan seberapa dekat hasil simulasi terhadap garis regresi nilai pengukuran. Metode analisis dengan r^2 digunakan Amos-Abanyie dkk (2013) dalam memverifikasi hasil simulasi *EnergyPlus* seperti yang ditunjukkan gambar 3.9. Klasifikasi nilai regresi linear menurut Moore, Notz, dan Flinger (2013)

ditunjukkan tabel 3.16. Sementara ASHRAE dan IPVMP merekomendasikan nilai r^2 tidak lebih kecil dari 0,75.

$$R^2 = n \cdot \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot s_i - \sum_{i=1}^n m_i \cdot \sum_{i=1}^n s_i}{\sqrt{(n \cdot \sum_{i=1}^n m_i^2 - (\sum_{i=1}^n m_i)^2) \cdot (n \cdot \sum_{i=1}^n s_i^2 - (\sum_{i=1}^n s_i)^2)}} \quad (3.2)$$

Tabel 3. 15 Standar verifikasi berdasarkan FEMP, ASHRAE, dan IPMVP

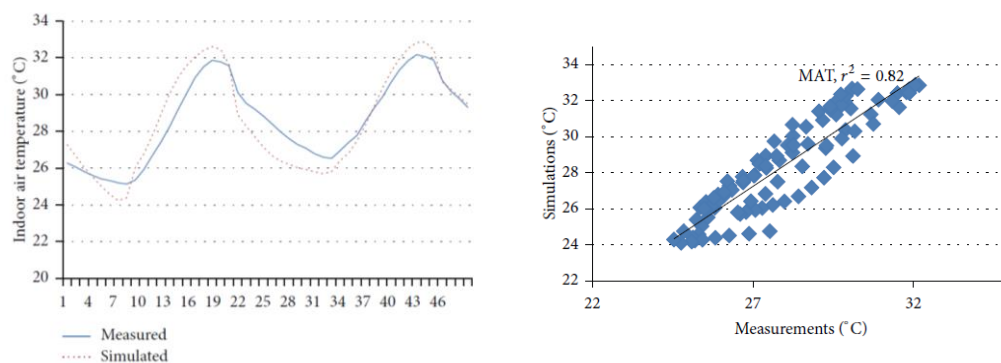
Jenis data	Indeks	FEMP	ASHRAE	IPMVP
Per bulan (%)	CV (RMSE)	15	15	-
Per jam (%)	CV (RMSE)	30	30	20
	R^2		> 0,75	> 0,75

sumber: Ruiz dan Bandera (2017)

Tabel 3. 16 Klasifikasi nilai regresi

Nilai regresi	Hubungan antar variabel
$R^2 < 0,3$	Hubungan atau pengaruh antar variabel sangat lemah.
$0,3 < R^2 < 0,5$	Hubungan atau pengaruh antar variabel lemah.
$0,5 < R^2 < 0,7$	Hubungan atau pengaruh antar variabel cukup.
$R^2 > 0,7$	Hubungan atau pengaruh antar variabel sangat kuat.

sumber: Moore, Notz, & Flinger (2013: 138)



Gambar 3. 9 Metode analisis hasil verifikasi oleh Amos-Abanyie, Akuffo, dan Kutin-Sanwu (2013)

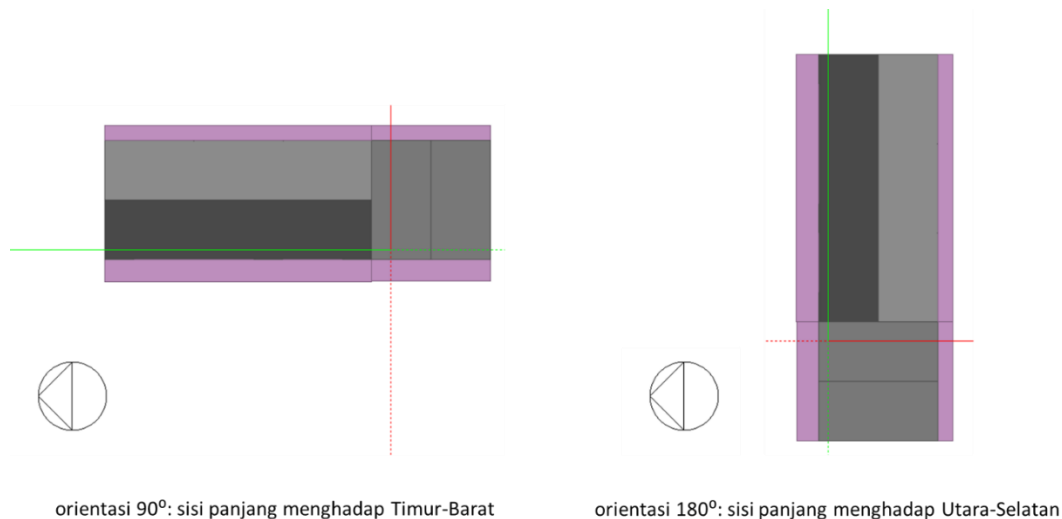
3.6 Rancangan eksperimen

Eksperimen dilakukan untuk mengetahui pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat. Eksperimen dilakukan dengan simulasi menggunakan

DesignBuilder. Total model yang disimulasikan adalah 40 model dengan variasi orientasi, aspek rasio, dan luas jendela.

a. Orientasi

Orientasi yang diuji adalah 90° dan 180° sesuai gambar 3.10. Sudut dihitung dari arah hadap sisi panjang bangunan (L) yang hanya terdiri atas jendela. Kondisi 90° menunjukkan sisi panjang bangunan menghadap Timur dan Barat, dimana Timur merupakan arah datang angin dengan frekuensi tertinggi di Surabaya. Sementara kondisi 180° adalah saat sisi panjang bangunan menghadap Selatan dan Utara, dimana radiasi panas yang diterima lebih rendah.



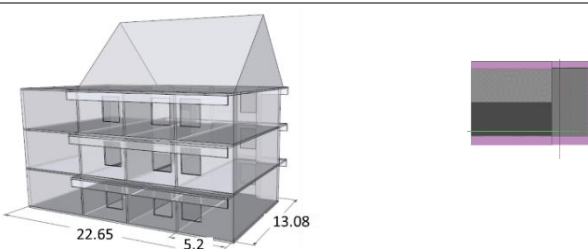
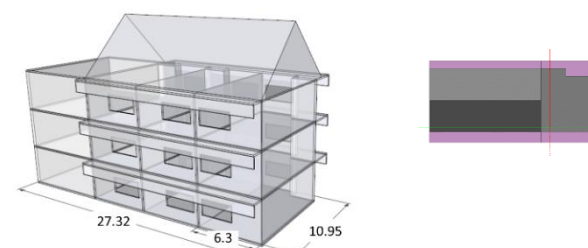
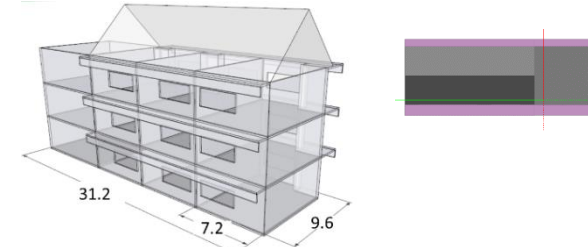
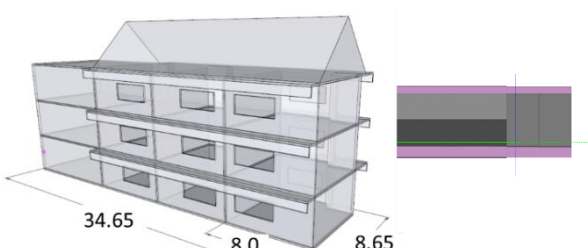
Gambar 3. 10 Orientasi yang diuji dalam eksperimen

b. Aspek rasio (L/W)

Aspek rasio yang diuji adalah 1,75 hingga 4 dengan interval 0,75. Pemilihan aspek rasio mewakili sampel bangunan. Interval 0,75 dipilih karena sensitivitas interval di bawah itu rendah (Inanici & Demirbilek, 2000). Berangkat dari aspek rasio *base case* (3,25), aspek rasio 1,75 mewakili bentuk kompak yang umum digunakan di bangunan berpendinghawaan mekanis sementara 4 mewakili bangunan berpendinghawaan hibrida yang umumnya memanjang. Aspek rasio lebih rendah dari 1,75 memiliki lebar ruang melebihi *rule of thumb* ruang berpendinghawaan silang (lebih dari 15 m). Tiap model memiliki volume yang tetap. Perubahan aspek rasio

menunjukkan perubahan pada ukuran panjang dan lebar ruang kelas. Tabel 3.17 menunjukkan aspek rasio yang akan diteliti. Acuan pemilihan aspek rasio yang diuji adalah sampel penelitian, Liddament (1996) serta Riley, Cotgrave, dan Farragher (2017).

Tabel 3. 17 Aspek rasio yang diuji

Aspek rasio	Panjang (L)	Lebar (W)	Ilustrasi
1,75:1	22,65 m	13,08 m	
2,5:1	27,32 m	10,95 m	
3,25:1	31,2 m	9,6 m	
4:1	34,65 m	8,65 m	

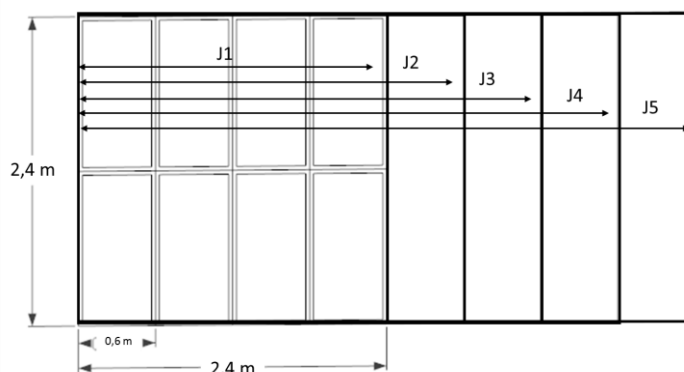
c. Luas jendela

Dalam studi ini, semua jendela diasumsikan jendela yang dapat dioperasikan (buka/tutup) sehingga luas bidang transparan sama dengan luas

bukaan. Untuk menghadirkan penghawaan silang, bukaan yang menghadap arah datang angin minimum 20% dari luas permukaan (Organization of American States, 2013). Sementara terkait beban pendinginan, Lam, Li, dan Yuen (1998) dalam Fairuz, Fadzil, dan Byrd (2014) menyatakan presentase kaca optimum antara 15 - 35% dari dinding. Presentase optimum menunjukkan hubungan penghematan energi karena pencahayaan alami dan konsumsi energi untuk pendinginan. Dalam penelitian ini semua jendela diasumsikan jendela yang dapat dioperasikan. Pada studi ini, luas jendela *inlet* dan *outlet* sama besar. Ukuran *inlet* dan *outlet* yang sama besar pada dinding sejajar akan menghasilkan kecepatan rata-rata tertinggi (Allard, 1998:70). Tabel 3.18 menunjukkan luas jendela yang akan dipelajari dalam studi ini. Penambahan luas jendela dilakukan dengan menambah lebar jendela seperti yang ditunjukkan gambar 3.11. Gupta (2017) menyatakan bila ukuran *inlet* tetap dan *outlet* sama, kecepatan angin akan meningkat seiring peningkatan lebar bukaan. Pengecualian dilakukan pada model dengan aspek rasio 1,75 yang memiliki dinding yang lebih sempit sehingga penambahan luas jendela dilakukan dengan menambah jendela terpisah.

Tabel 3. 18 Luas jendela yang akan diuji

	Total luas jendela/ model (m ²)	WWR (%)			
		1,75:1	2,5:1	3,25:1	4:1
J1	34.6	27.7	22.9	20	18
J2	43.2	34.6	28.6	25	22.5
J3	51.8	41.5	34.3	30	27
J4	60.5	48.5	40.0	35	31.5
J5	69.1	55.4	45.7	40	36



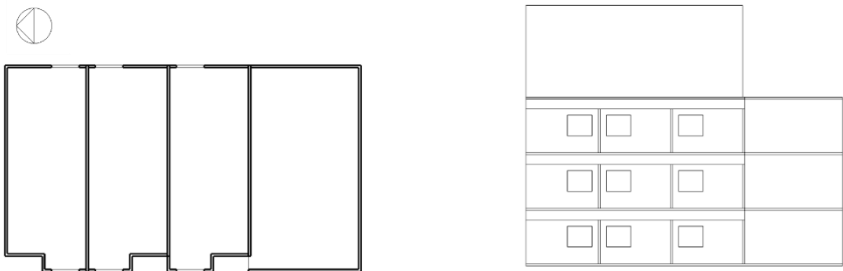
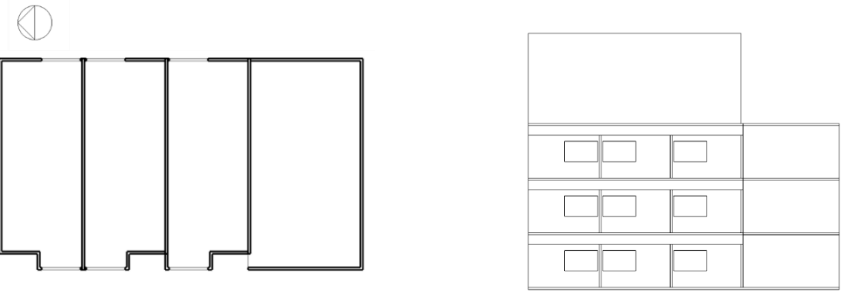
Gambar 3. 11 Ilustrasi variasi luas jendela yang diuji

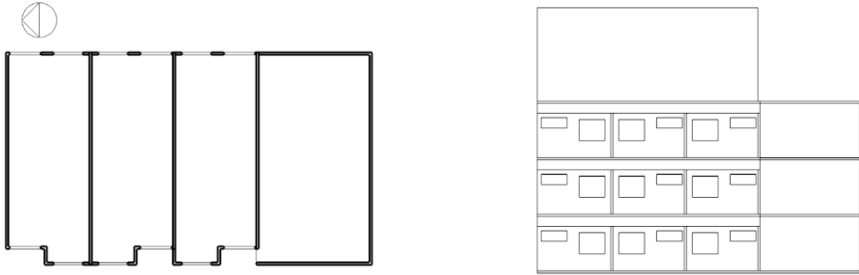
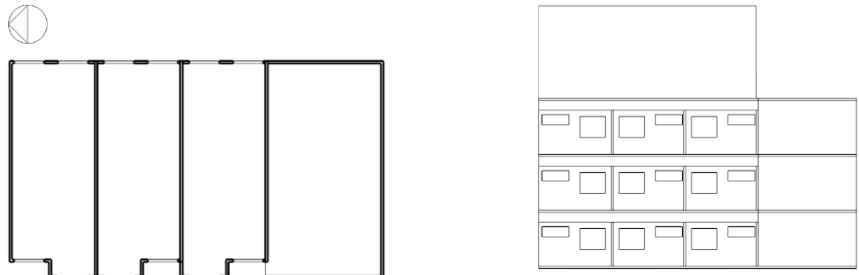
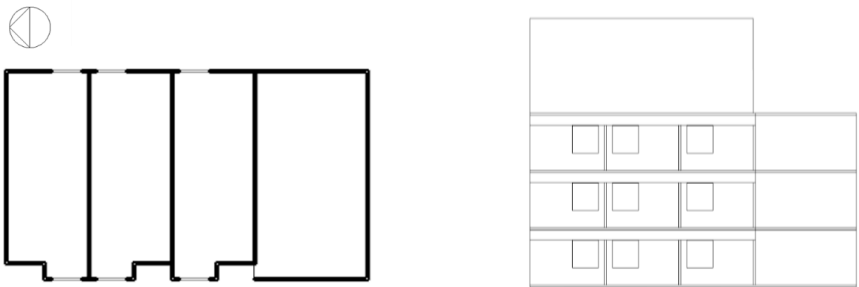
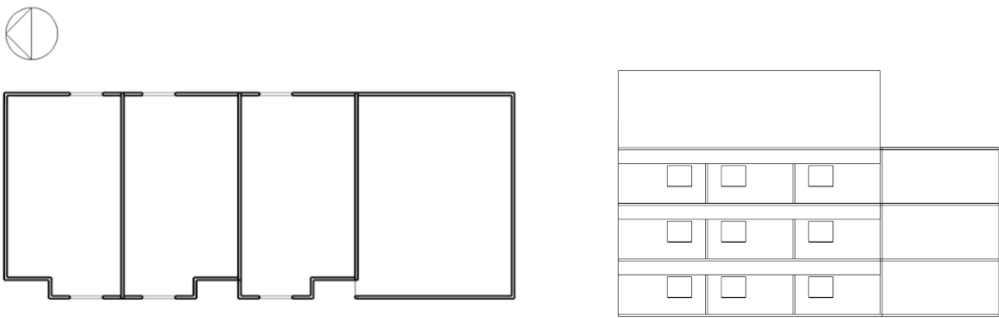
Tabel 3.19 menunjukkan penamaan kode eksperimen. Kode A,B,C,D mewakili aspek rasio 1,75, 2,5, 3,25, 4 sementara 1-5 mewakili J1 – J5. Orientasi Timur-Barat diwakili T dan Utara-Selatan diwakili S. Sebagai contoh, A1T mewakili model dengan aspek rasio 1,75, luas jendela J1 (34.6 m²) dan sisi panjang berorientasi ke Timur-Barat. Total 40 model akan disimulasikan. Tabel 3.20 menunjukkan rancangan eksperimen yang akan dilakukan untuk orientasi 90⁰. Model yang sama akan disimulasikan dengan orientasi 180⁰.

Tabel 3. 19 Penamaan kode model eksperimen

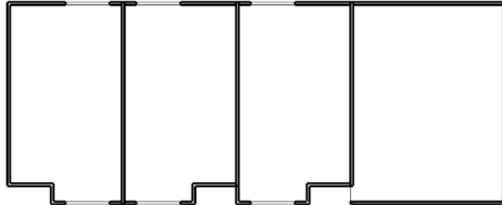
Aspek rasio	Kode	Luas jendela	Kode	Orientasi	Kode
1,75 : 1	A	J1 (34.6 m ²)	1	Timur-Barat (90 ⁰)	T
2,5 : 1	B	J2 (43.2 m ²)	2	Utara-Selatan (180 ⁰)	S
3,25 : 1	C	J3 (51.8 m ²)	3		
4 : 1	D	J4 (60.5 m ²)	4		
		J5 (69.1 m ²)	5		

Tabel 3. 20 Rancangan eksperimen untuk orientasi 90⁰

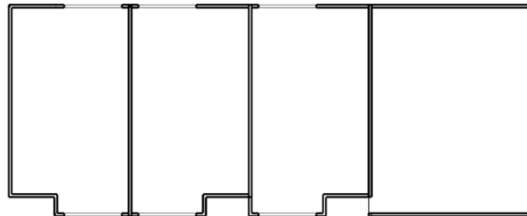
Kode	Orientasi	Aspek rasio	Luas jendela	Tampak model
A1T	90 ⁰	1,75:1	J1	
A2T	90 ⁰	1,75:1	J2	

Kode	Orientasi	Aspek rasio	Luas jendela	Tampak model
A3T	90°	1,75:1	J3	
A4T	90°	1,75:1	J4	
A5T	90°	1,75:1	J5	
B1T	90°	2,5:1	J1	

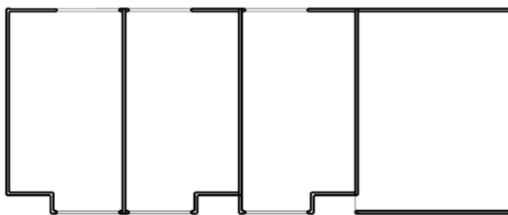
Kode	Orientasi	Aspek rasio	Luas jendela	Tampak model
B2T	90°	2,5:1	J2	



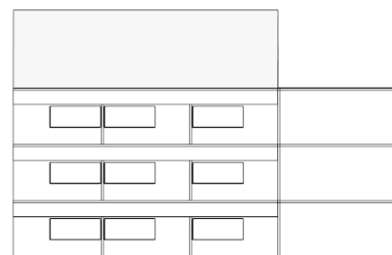
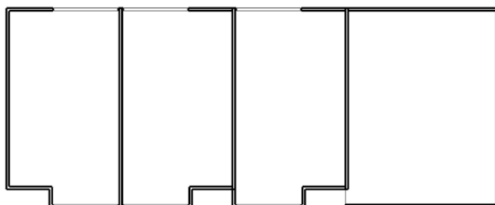
B3T	90°	2,5:1	J3	
-----	-----	-------	----	--

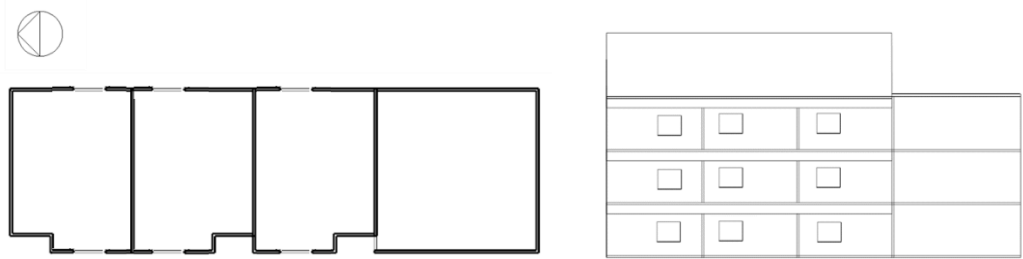
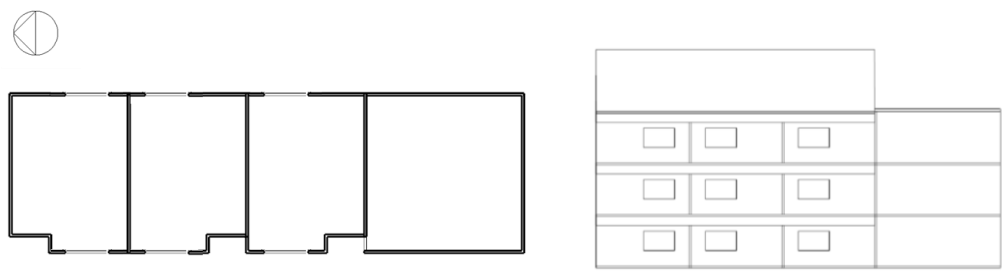
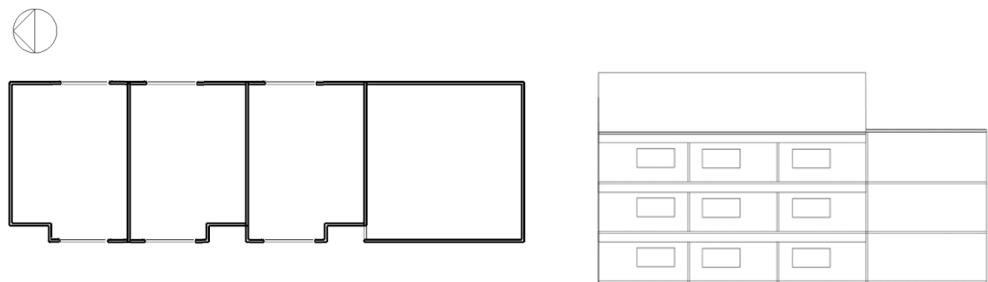
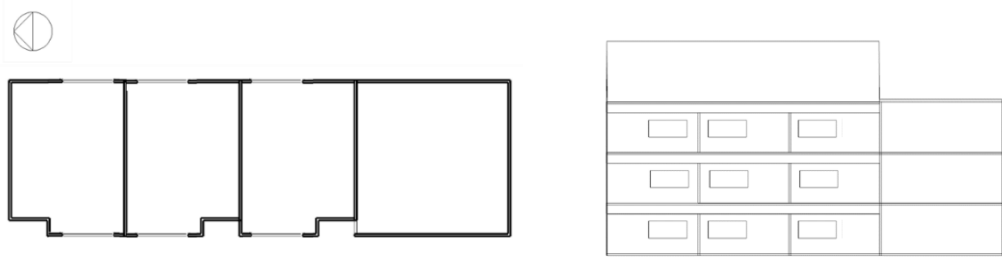


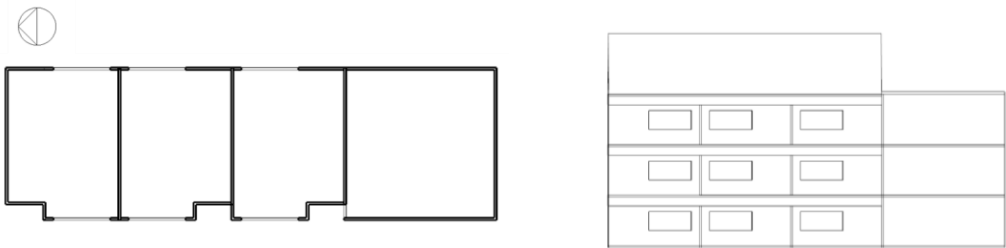
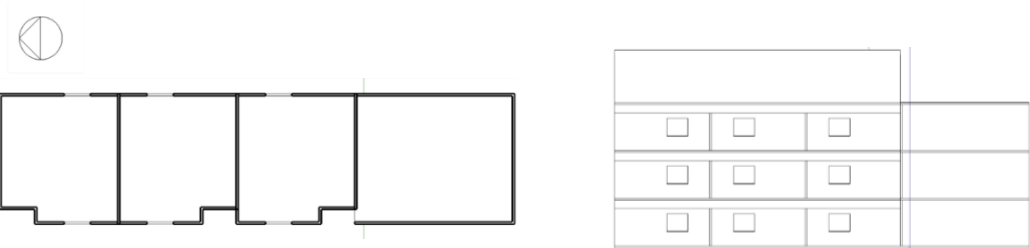
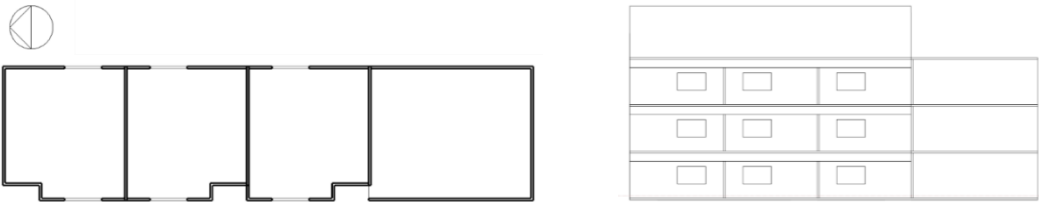
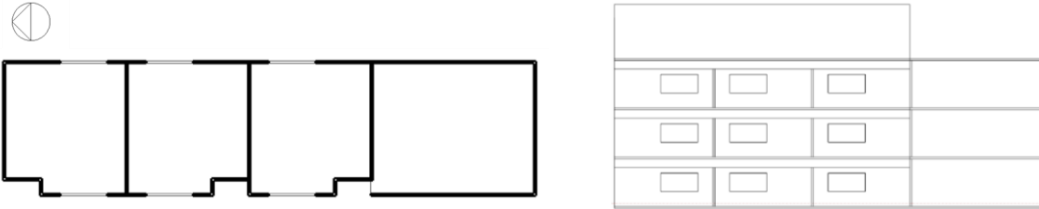
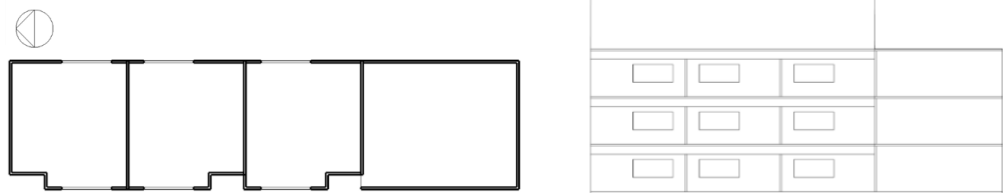
B4T	90°	2,5:1	J4	
-----	-----	-------	----	--



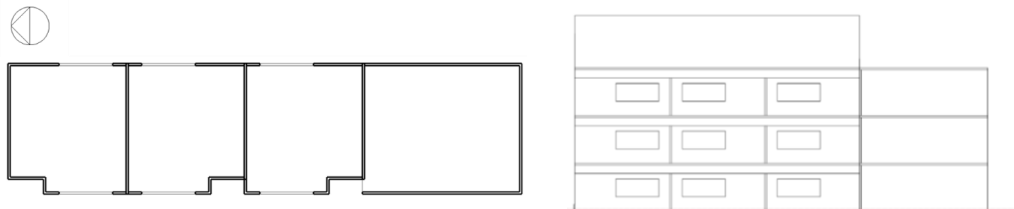
B5T	90°	2,5:1	J5	
-----	-----	-------	----	--



Kode	Orientasi	Aspek rasio	Luas jendela	Tampak model
C1T	90°	3,25:1	J1	
C2T	90°	3,25:1	J2	
C3T	90°	3,25:1	J3	
C4T	90°	3,25:1	J4	

Kode	Orientasi	Aspek rasio	Luas jendela	Tampak model
C5T	90°	3,25:1	J5	
				
D1T	90°	4:1	J1	
				
D2T	90°	4:1	J2	
				
D3T	90°	4:1	J3	
				
D4T	90°	4:1	J4	
				

Kode	Orientasi	Aspek rasio	Luas jendela	Tampak model
D5T	90°	4:1	J5	



3.7 Metode analisis dan presentasi data

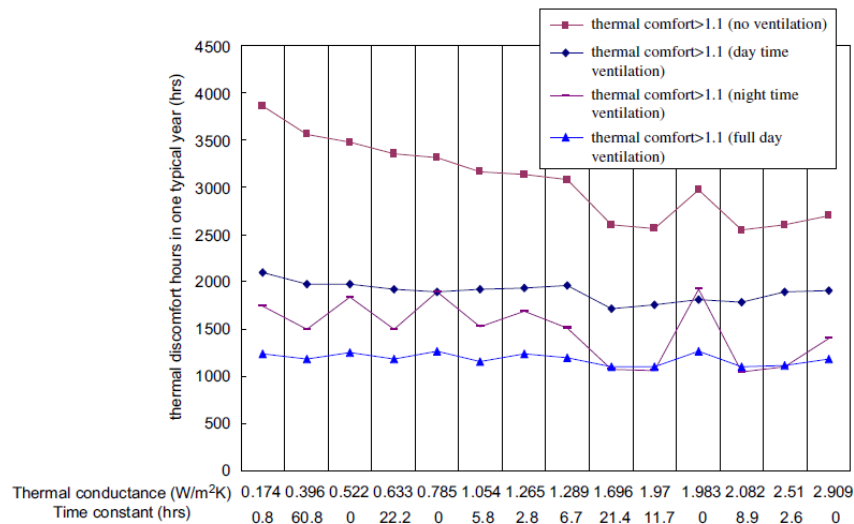
3.7.1 Metode analisis data iklim

Analisis iklim makro bertujuan untuk mengetahui kondisi termal lingkungan sekitar objek studi. Data iklim makro Surabaya digunakan sebagai *input* simulasi. Data iklim rata-rata dalam lima tahun terakhir (2013 - 2017) dianalisis untuk melihat kondisi terekstrim, bulan terdingin dan terpanas. Kondisi terekstrim dipilih sebagai waktu simulasi, untuk mewakili kondisi dalam setahun. Selain itu, analisis data iklim juga bertujuan melihat keterwakilan data tahun terakhir (2017) sebagai *input* simulasi. Data iklim yang akan dianalisis meliputi temperatur udara, kelembaban, kecepatan angin dan arah, serta radiasi matahari. Data iklim per bulan dipresentasikan dalam grafik untuk melihat polanya. Data rata-rata per jam saat bulan terdingin dan terpanas juga dianalisis untuk melihat fenomena kondisi termal khususnya ketika waktu okupansi. Metode analisis data iklim serupa juga dilakukan Haase dan Amato (2009) serta Al-Tamimi dan Fadzil (2011).

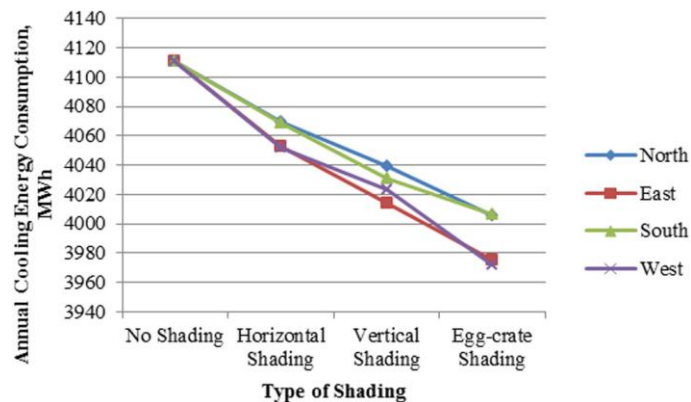
3.7.2 Metode analisis kinerja termal dan efisiensi energi

Analisis kinerja termal dilakukan dengan indikator *discomfort hour* yaitu presentase waktu di luar rentang nyaman. Parameter rentang nyaman sesuai dengan rekomendasi. ASHRAE 55-2004. *Discomfort hour* dievaluasi saat moda pasif (penghawaan alami). Liping dan Hien (2007) menggunakan grafik yang menghubungkan variabel desain (properti termal material) dan *discomfort hour* seperti yang ditunjukkan gambar 3.12. Sementara analisis efisiensi energi saat moda aktif dilakukan dengan indikator energi pendinginan (kWh). Energi

pendinginan adalah energi yang dibutuhkan oleh mesin AC untuk mengondisikan bangunan. Lau dkk (2016) dalam mempresentasikan hubungan variabel desain (jenis peneduh) dan konsumsi energi seperti yang ditunjukkan gambar 3.13. Karava dkk (2012) menggunakan regresi linear guna mengetahui keterkaitan atau hubungan aspek desain dan kinerja bangunan.



Gambar 3. 12 Metode presentasi hubungan variabel bebas dan *discomfort hour* (Liping dan Hien, 2007)

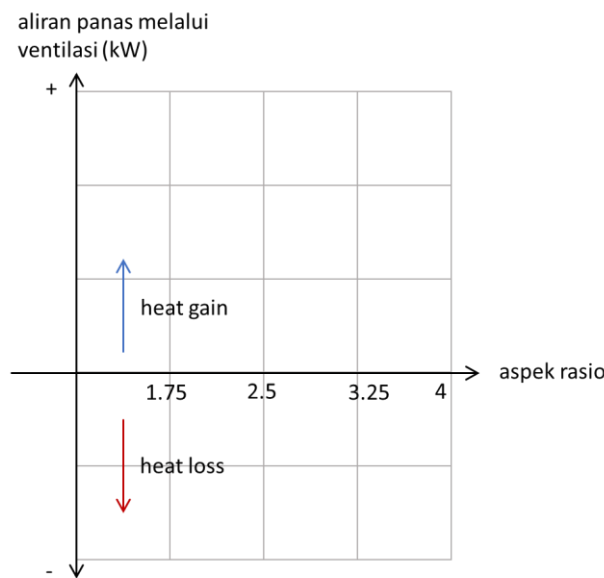


Gambar 3. 13 Metode presentasi hubungan variabel bebas dan energi pendinginan (Lau dkk, 2016)

3.7.3 Metode analisis pengaruh desain terhadap kinerja termal dan energi

Analisis pengaruh desain terhadap kinerja termal dan energi bangunan dilakukan dengan kuadran yang menghubungkan aspek desain dengan variabel

yang mempengaruhi kinerja bangunan. Kinerja termal dan energi bangunan dipengaruhi perpindahan panas, baik secara konduksi, konveksi, maupun radiasi. Dengan grafik yang menghubungkan aspek desain dan variabel yang mempengaruhi kinerja bangunan (seperti variabel lingkungan, perpindahan panas, dan lainnya), pengaruh desain terhadap kinerja bangunan dapat dianalisis lebih lanjut. Gambar 3.14 menunjukkan contoh grafik hubungan variabel desain (aspek rasio) terhadap aliran panas melalui ventilasi.

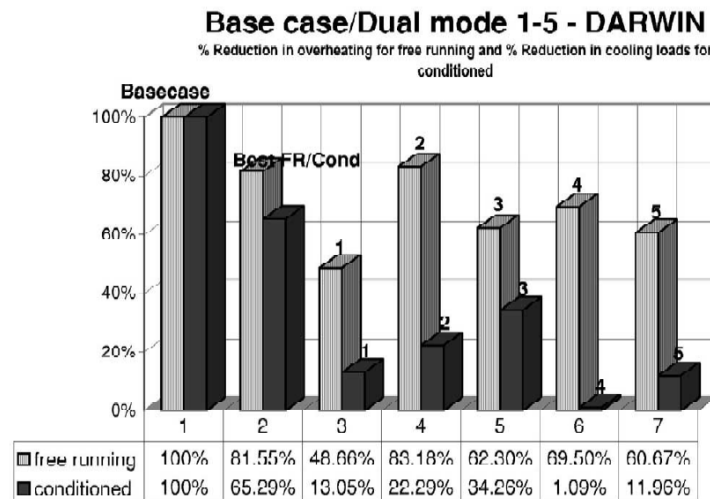


Gambar 3. 14 Grafik pengaruh desain terhadap kinerja bangunan

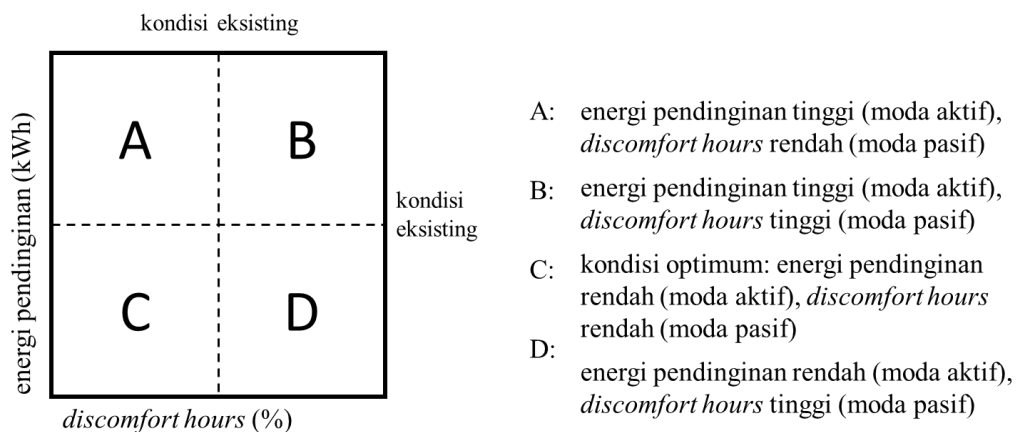
3.7.4 Metode optimasi

Optimasi dilakukan untuk mengetahui konfigurasi selubung teroptimum untuk bangunan pendidikan di iklim tropis lembab. Indikator yang digunakan adalah kinerja termal (*discomfort hour*) dan energi pendinginan. Optimasi dibagi menjadi dua bagian. Bagian pertama menggunakan parameter kinerja termal dan energi *base case*. Tenorio (2002) menggunakan metode presentasi tersebut dalam penelitiannya terhadap hunian berpendingin hibrida (Gambar 3.15). Gambar 3.16 menunjukkan kuadran evaluasi hubungan antara kinerja termal (saat moda pasif) dan energi pendinginan (saat moda aktif). Kondisi eksisting menjadi batasan untuk menentukan apakah beban pendinginan tergolong tinggi atau rendah. Hal yang

sama berlaku pada *discomfort hours*. Hasil optimal tercapai pada kondisi C dimana *discomfort hours* dan energi pendinginan lebih rendah dari kondisi *base case*.



Gambar 3. 15 Metode presentasi beban pendinginan dan durasi *overheating* (Tenorio, 2002)



Gambar 3. 16 Kuadran evaluasi bagian pertama

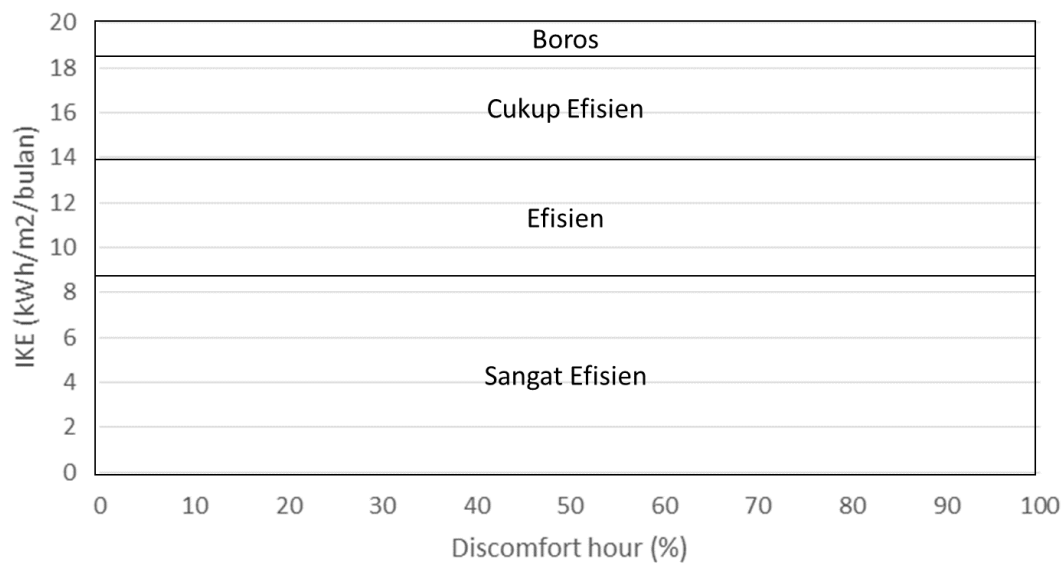
Pada bagian kedua, parameter yang digunakan adalah standar yang berlaku di Indonesia. Indikator energi adalah IKE (Intensitas Konsumsi Energi) atau EUI (*Energy Use Intensity*). IKE didefinisikan sebagai besar energi yang digunakan suatu bangunan gedung perluas area yang dikondisikan dalam satu bulan atau satu tahun (Peraturan Gubernur No. 38 tahun 2012). Area yang dikondisikan adalah area yang diatur temperatur ruangnya sedemikian rupa sehingga memenuhi standar

kenyamanan dengan udara sejuk disuplai dari sistem tata udara gedung. Berdasarkan Peraturan Gubernur No. 38 tahun 2012, standar IKE untuk bangunan sekolah adalah 195 – 265 kWh/m²/tahun. Terdapat pula klasifikasi nilai IKE berdasarkan Permen ESDM No. 13/2012 yang ditunjukkan Tabel 3.21. Sementara kinerja termal menggunakan parameter rentang nyaman SNI 6390 – 2011 (Bab 2). Kondisi optimum pada kuadran evaluasi yang ditunjukkan gambar 3.17 adalah kiri bawah, IKE tergolong sangat efisien dan *discomfort hour* rendah.

Tabel 3. 21 Klasifikasi nilai IKE

Kriteria	Gedung ber-AC (kWh/m ² /bulan)	Gedung tanpa AC (kWh/m ² /bulan)
Sangat efisien	< 8,5	< 3,4
Efisien	8,5 – 14	3,4 – 5,6
Cukup efisien	14 – 18,5	5,6 – 7,4
Boros	> 18,5	> 7,4

sumber: Permen ESDM No. 13/2012



Gambar 3. 17 Kuadran evaluasi bagian dua

Kecepatan angin tertentu dapat memperluas zona nyaman dan meningkatkan toleransi seseorang terhadap tingginya temperatur udara. *Building and Construction Authority* (2010) merekomendasikan kecepatan angin untuk memperluas rentang nyaman di iklim tropis seperti yang ditunjukkan tabel 3.22.

Rentang nyaman yang semakin luas mengindikasikan konsumsi energi pendinginan dapat ditekan bila kecepatan angin dalam ruang cukup.

Tabel 3. 22 Rekomendasi kecepatan angin untuk mencapai kenyamanan termal

Temperatur udara (°C)	Rekomendasi kecepatan angin (m/s)
28	0.3
29	0.5
30	0.8
> 31	1.2 – 2,2

sumber: Building and Construction Authority (2010)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

VERIFIKASI DAN KINERJA OBJEK EKSPERIMEN

Bab ini menyajikan hasil verifikasi simulasi, analisis iklim, serta kinerja objek eksperimen. Verifikasi menunjukkan realibilitas hasil simulasi. Analisis iklim makro dilakukan untuk mengetahui kondisi terekstrim sebagai *input* simulasi. Bagian terakhir, kinerja objek eksperimen terhadap energi pendinginan dan *discomfort hour* diuraikan untuk melihat faktor-faktor yang berpengaruh.

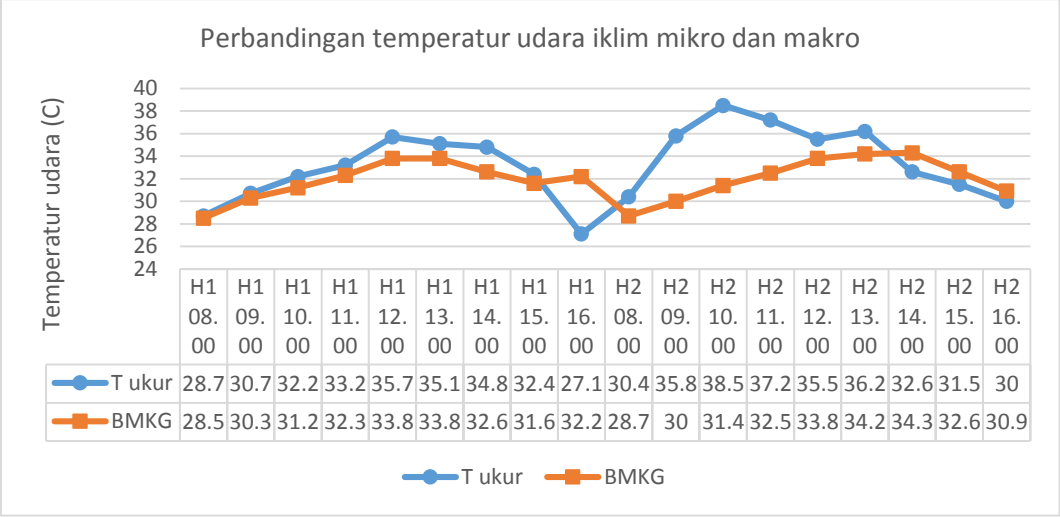
4.1 Hasil verifikasi

4.1.1 Verifikasi data iklim

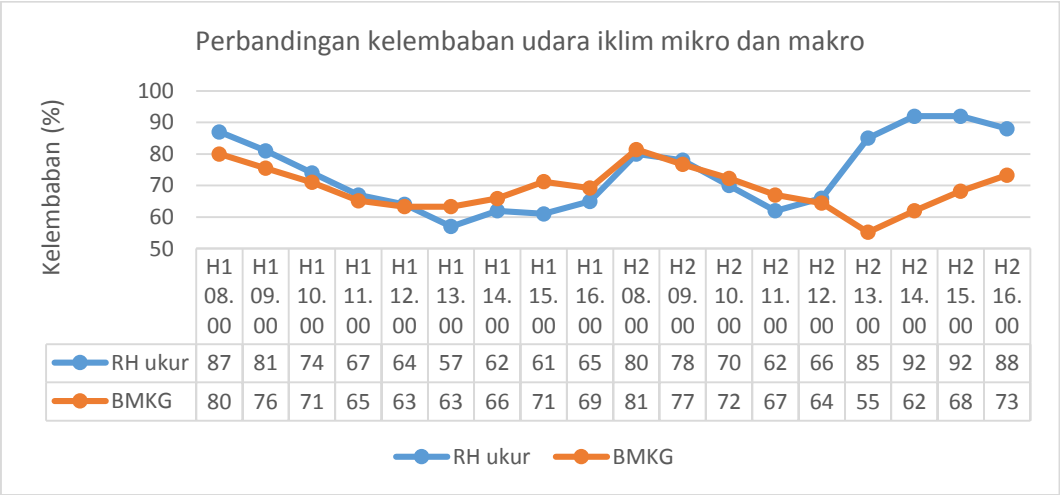
Iklim makro dibandingkan dengan iklim mikro untuk melihat apakah data iklim makro dapat mewakili iklim mikro saat simulasi. Iklim makro Surabaya diperoleh dari BMKG Surabaya. Gambar 4.1 menunjukkan perbandingan temperatur udara iklim mikro dan makro tanggal 20 – 21 Februari 2018 (pukul 08.00 – 16.00). Pada tanggal 20 Februari 2018, temperatur udara iklim makro dan mikro memiliki pola yang sama. Perbedaan terjadi pada pukul 16.00 dimana temperatur udara iklim mikro menurun sementara pada iklim makro meningkat. Perbedaan tersebut dapat disebabkan kondisi langit yang mendung di daerah ITS saat sore hari. Pada tanggal 21 Februari 2018 perbedaan temperatur udara antara iklim mikro dan makro semakin besar. Temperatur udara hasil pengukuran iklim mikro selalu lebih tinggi dari iklim makro kecuali saat sore hari dimana kondisi langit mendung dan hujan di daerah ITS.

Gambar 4.2 menunjukkan perbandingan kelembaban udara iklim mikro dan makro tanggal 20 – 21 Februari 2018 (pukul 08.00 – 16.00). Grafik kelembaban udara antara iklim mikro dan makro memiliki pola yang sama kecuali saat siang dan sore hari. Pada tanggal 20 Februari 2018, kelembaban udara antara iklim mikro dan makro mulai berbeda pukul 13.00. Pengukuran menunjukkan nilai kelembaban menurun sementara kelembaban iklim makro kembali meningkat. Sebaliknya, tanggal 21 Februari 2018 mulai pukul 12.00, kelembaban hasil pengukuran

mengalami peningkatan sementara iklim makro menunjukkan kelembaban yang menurun sebelum akhirnya meningkat.



Gambar 4. 1 Perbandingan temperatur udara iklim mikro dan makro

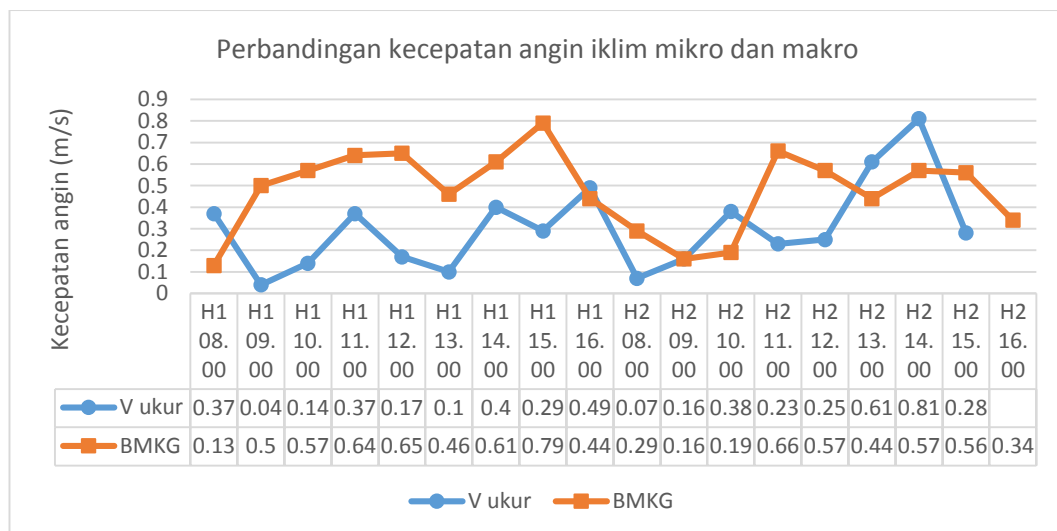


Gambar 4. 2 Perbandingan kelembaban udara iklim mikro dan makro

Kecepatan angin iklim makro dikonversikan dengan persamaan *Power Law* dimana iklim makro diukur pada kondisi *open country* ($Z_G = 300\text{ m}$, $\alpha = 0,15$) dan iklim makro pada kondisi *city center* ($Z_G = 500\text{ m}$, $\alpha = 0,36$).

$$\frac{V_z}{V_{zg}} = \left(\frac{z}{z_g}\right)^{\alpha} \tag{4. 1}$$

V_z merupakan kecepatan angin pada ketinggian z dan V_{zg} merupakan kecepatan angin pada ketinggian z_g , α adalah koefisien kekerasan lahan (*ground roughness*). Gambar 4.3 menunjukkan perbandingan kecepatan angin iklim mikro dan makro. Kecepatan angin hasil pengukuran berada di rentang 0,04 – 0,81 m/s sementara kecepatan angin iklim makro sekitar 0,13 -0,79 m/s. Kecepatan angin BMKG hampir selalu lebih tinggi dari hasil pengukuran. Meskipun memiliki nilai yang berbeda, iklim mikro dan makro memiliki pola yang sama. Salah satu faktor yang mempengaruhi perbedaan iklim mikro dan makro adalah kondisi langit mendung atau hujan. Secara garis besar, data iklim makro dapat digunakan mewakili iklim mikro pada simulasi.

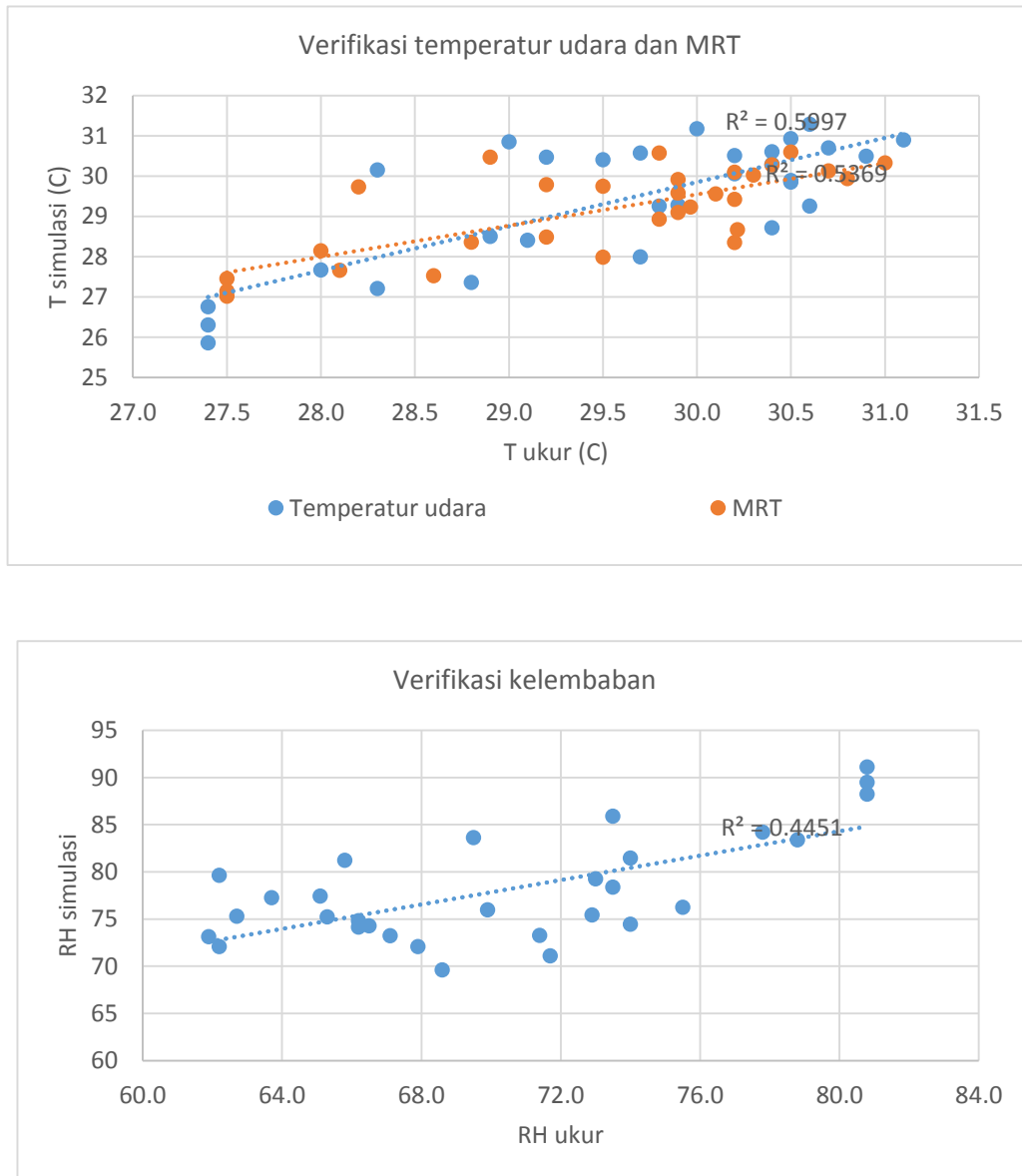


Gambar 4. 3 Perbandingan kecepatan angin iklim mikro dan makro

4.1.2 Hasil verifikasi kondisi penghawaan alami

Gambar 4.4 menunjukkan hubungan hasil pengukuran dan simulasi di ruang berpenghawaan alami. Nilai regresi temperatur udara dan MRT antara hasil pengukuran dan simulasi adalah $R^2 = 0,5997$ dan $R^2 = 0,5369$. Nilai regresi kelembaban udara antara hasil pengukuran dan simulasi adalah $R^2 = 0,4451$. Berdasarkan klasifikasi nilai regresi oleh Moore, Notz, dan Flinger (2013), hubungan hasil pengukuran dan simulasi temperatur udara dan MRT tergolong cukup sedangkan untuk kelembaban tergolong lemah. Namun, ketiganya belum memenuhi rekomendasi ASHRAE dan IPVMP. Tabel 4.1 menunjukkan presentase

CV (RMSE) antara hasil pengukuran dan simulasi pada ruang berpenghawaan alami. Meskipun, r^2 tidak memenuhi rekomendasi ASHRAE dan IPVMP, nilai CV (RMSE) memenuhi nilai yang direkomendasikan pada Tabel 3.15. Oleh karena itu, dapat dikatakan hasil simulasi saat penghawaan alami memiliki realibilitas yang cukup baik.



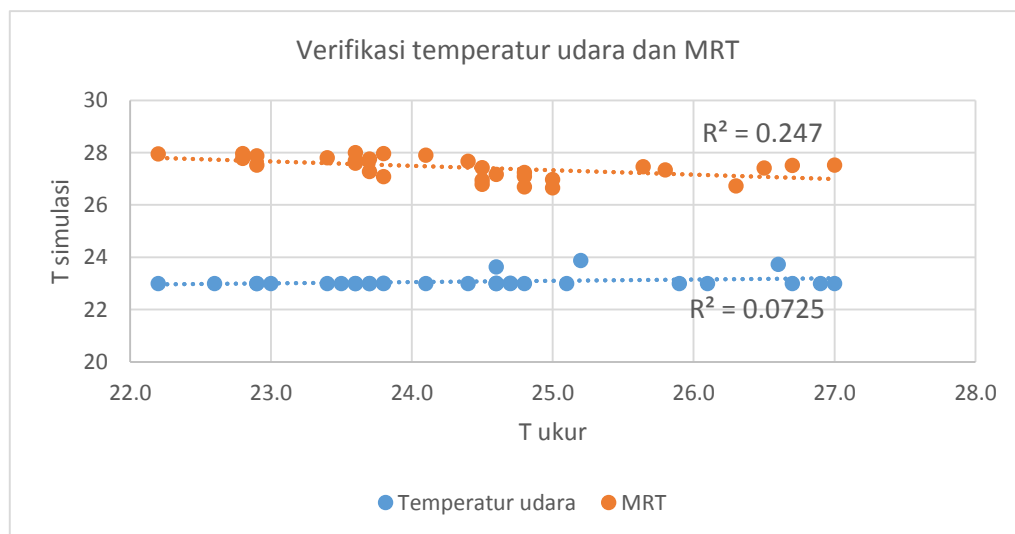
Gambar 4. 4 Hubungan antara hasil pengukuran dan simulasi di ruang berpenghawaan alami

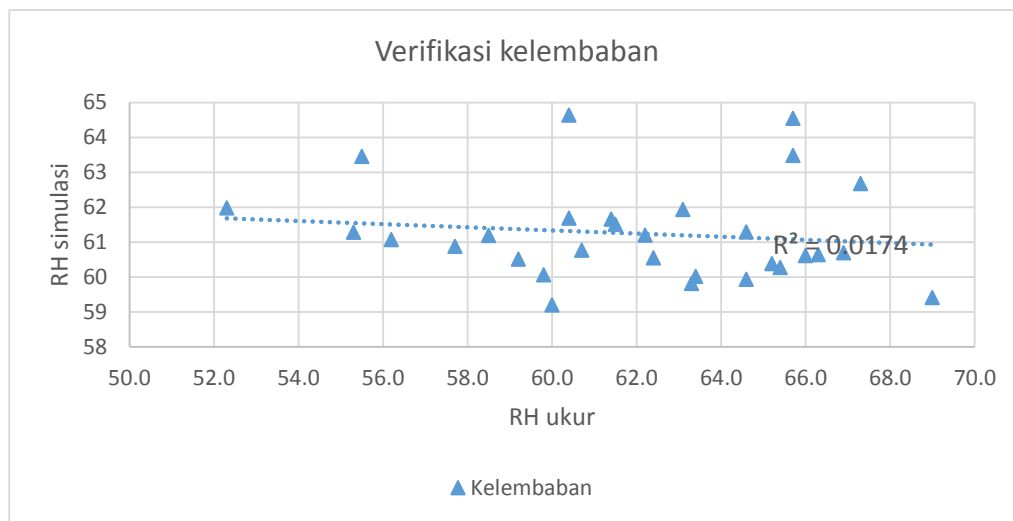
Tabel 4. 1 Hubungan hasil pengukuran dan simulasi saat moda pasif

Indeks	Penghawaan alami		
	T	MRT	RH
RMSE (%)	0,99	0,84	9
CV (RMSE) (%)	3,35	2,84	12,8
R ²	0,59	0,54	0,45

4.1.3 Hasil verifikasi kondisi penghawaan mekanis

Gambar 4.5 menunjukkan hubungan hasil pengukuran dan simulasi di ruang berpenghawaan mekanis (AC). Nilai regresi temperatur udara antara hasil pengukuran dan simulasi adalah $R^2 = 0,247$. Sementara nilai regresi MRT (*radiant temperature*) antara hasil pengukuran dan simulasi adalah $R^2 = 0,0725$. Berdasarkan klasifikasi Moore, Notz, Flinger (2013), hubungan hasil pengukuran dan simulasi temperatur udara dan MRT sangat lemah. Begitu pula pada kelembaban udara, dengan nilai regresi $R^2 = 0,0174$. Hubungan yang lemah tersebut disebabkan saat simulasi, ketika AC digunakan, temperatur udara menjadi konstan terlepas dari panas internal. Kalkulasi dalam DesignBuilder dilakukan dengan metode *periodic steady state*, dimana AC akan bekerja memenuhi *cooling setpoint*. Sementara saat pengukuran, panas internal membuat temperatur udara dalam ruang meningkat. Dalam studi ini, kondisi dengan AC menyala disimulasikan untuk melihat energi pendinginan. Karena kalkulasi dilakukan dalam kondisi *steady state*, hasilnya ditujukan hanya untuk menentukan laju maksimum penerimaan atau pelepasan panas.





Gambar 4. 5 Hubungan antara hasil pengukuran dan simulasi di ruang berpenghawaan mekanis

Tabel 4.2 menunjukkan presentase CV (RMSE) antara hasil pengukuran dan simulasi pada ruang berpenghawaan mekanis. Meskipun, r^2 tidak memenuhi rekomendasi ASHRAE dan IPVMP, nilai CV (RMSE) memenuhi nilai yang direkomendasikan pada Tabel 3.12. Nilai CV (RMSE) temperatur udara, MRT, dan RH masing-masing 7,56, 13,8, dan 7,13%. Angka tersebut tidak melebihi standar yang direkomendasikan, yaitu 15 – 30%. Oleh karena itu, dapat dikatakan hasil simulasi saat penghawaan alami memiliki realibilitas yang cukup baik.

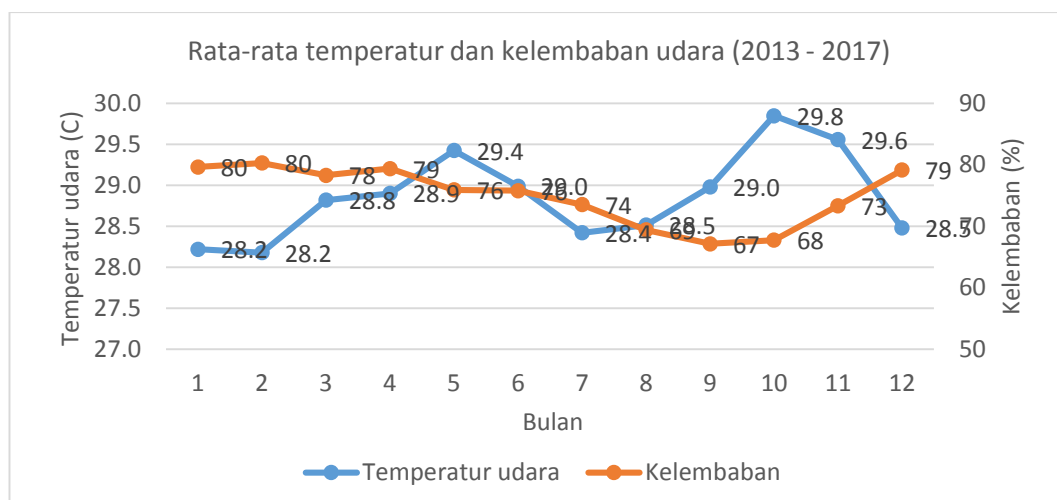
Tabel 4. 2 Hubungan hasil pengukuran dan simulasi saat moda pasif

Indeks	Penghawaan mekanis		
	T	MRT	RH
RMSE (%)	1,85	3,37	4,42
CV (RMSE) (%)	7,56	13,8	7,13
R²	0,25	0,07	0,02

4.2 Iklim makro Surabaya

Secara geografis, Surabaya terletak antara 7,21° Lintang Selatan dan 112,36° – 112,54° Bujur Timur. Kota ini merupakan daratan rendah dengan ketinggian 3 – 6 m di atas permukaan air laut, kecuali daerah Selatan dengan ketinggian 25 – 50 m di atas permukaan laut. Data iklim selama 5 tahun terakhir, tahun 2013 hingga 2017, digunakan untuk menganalisis kondisi iklim makro

Surabaya. Data iklim tahun 2017 digunakan sebagai *input* simulasi dalam penelitian ini. Data iklim Surabaya selama 5 tahun terakhir disertakan di lampiran 1. Gambar 4.6 menunjukkan grafik rata-rata temperatur dan kelembaban udara di Surabaya dalam 5 tahun terakhir. Rata-rata temperatur udara tertinggi adalah 29,8°C di bulan Oktober. Rata-rata temperatur udara terendah terjadi di bulan Januari, yaitu 28,2°C. Rata-rata kelembaban udara selalu berada di atas 60% dengan nilai tertinggi 80% (Januari dan Februari) dan terendah 67% (September).

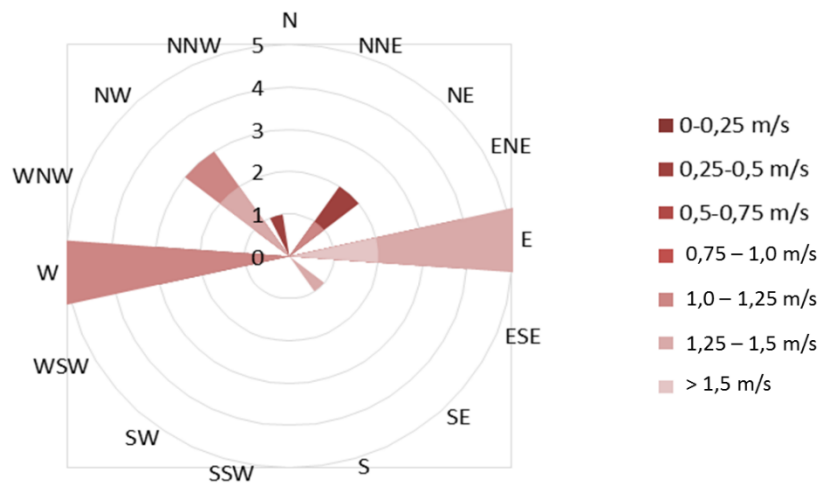


Gambar 4. 6 Grafik rata-rata temperatur dan kelembaban udara tahun 2013 – 2017

Dari rata-rata 5 tahun terakhir, bulan terdingin terjadi di bulan Januari (temperatur udara 28,2°C) sedangkan bulan terpanas di bulan Oktober (temperatur udara 29,8°C). Berdasarkan data iklim pada lampiran 4, rata-rata temperatur udara di bulan Januari mengalami peningkatan sejak tahun 2014 dan menurun pada tahun 2017 menjadi 27,4°C. Sementara itu, temperatur udara di bulan Oktober cenderung stabil meskipun mengalami peningkatan di tahun 2017 menjadi 29,7°C. Rata-rata kelembaban udara di Surabaya berkisar 67 – 80%. Kelembaban udara di bulan Desember hingga April lebih tinggi dibandingkan bulan Mei hingga November. Kelembaban yang tinggi pada musim hujan dapat mengakibatkan ketidaknyamanan.

Gambar 4.7 menunjukkan *wind rose* arah angin dan rata-rata kecepatan angin di Surabaya periode tahun 2013 hingga 2017. Arah angin didominasi Barat dan Timur dengan kecepatan angin tersering 1 – 1,5 m/s. Rata-rata kecepatan angin

tertinggi ditemukan pada bulan September (3,9 m/s) dan kecepatan angin terendah terjadi pada bulan Maret, April, dan Juni (2,7 m/s) seperti yang ditunjukkan di lampiran 4. Rata-rata kecepatan angin di Surabaya berada di atas batas kenyamanan oleh Koenigsberger (1973: 58) yaitu 1,5 m/s. Kecepatan angin yang tinggi merupakan potensi untuk menerapkan penghawaan alami. Namun, kecepatan angin dalam kota cenderung lebih rendah karena banyaknya hambatan. Untuk meningkatkan penghawaan alami, bukaan sebaiknya diarahkan ke arah datang angin. Pada konteks Surabaya, sisi Timur-Barat merupakan arah angin tersering namun menerima radiasi matahari yang tinggi sehingga bersifat kontradiktif.

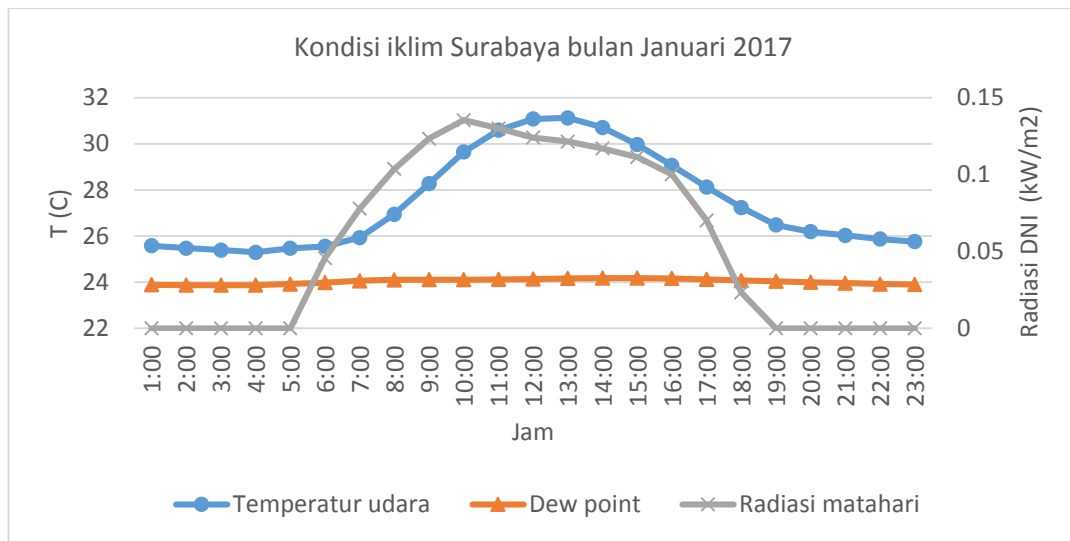


Gambar 4. 7 *Wind rose* Surabaya tahun 2013 – 2017 (BMKG II, Martavitri, 2018)

4.2.1 Bulan terdingin

Bulan Januari mewakili bulan terdingin di Surabaya pada periode tahun 2013 - 2017. Pada tahun 2017, rata-rata temperatur udara bulan Januari adalah 27,4°C dengan kelembaban 83%. Temperatur udara maksimum adalah 33,6°C dan minimum 23,5°C. Gambar 4.8 menunjukkan rata-rata kondisi iklim per jam bulan Januari 2017. Mulai pagi hari hingga pukul 08.00, rata-rata temperatur udara *outdoor* (25,3 – 26,9°C) masih memenuhi kondisi nyaman yang direkomendasikan ASHRAE 55-2004 maupun SNI 6390-2011. Di atas pukul 08.00, temperatur udara berada di luar rentang nyaman dan mencapai puncaknya pukul 13.00 (31,1°C). Peningkatan temperatur udara sejalan dengan peningkatan radiasi matahari. Rata-rata radiasi DNI (*Direct Normal Irradiance*) tertinggi yang diterima permukaan

bangunan saat bulan Januari adalah $0,135 \text{ kW/m}^2$. Radiasi DNI menunjukkan jumlah radiasi matahari yang diterima suatu area permukaan yang tegak lurus dengan matahari. Grafik menunjukkan, pada pagi hari temperatur udara mendekati *dew point temperature* yang menunjukkan kelembaban tinggi. *Dew point temperature* adalah temperatur dimana kelembaban relatif bernilai 100% (Koenigsberger dkk, 1974). Seiring peningkatan temperatur udara, kelembaban juga berkurang.



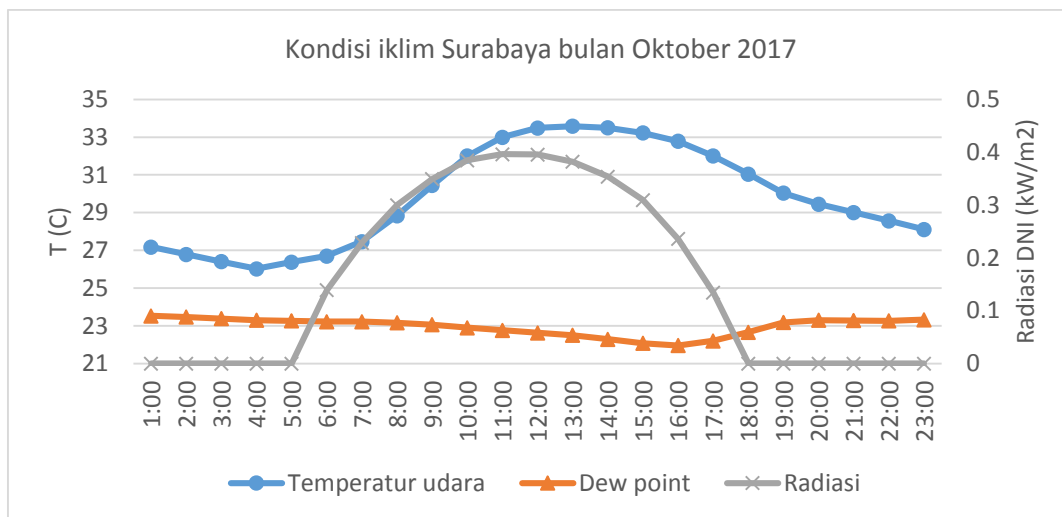
Gambar 4. 8 Rata-rata kondisi iklim per jam bulan Januari 2017

Saat pagi hari, kondisi bulan terdingin masih memenuhi rentang nyaman. Namun siang hingga sore hari saat operasional, kondisi *outdoor* kurang nyaman. Berdasarkan *Singapore Building and Construction Authority* (2010), kondisi nyaman untuk temperatur hingga 31°C masih dapat dipenuhi dengan bantuan kecepatan angin hingga $1,2 \text{ m/s}$. Penelitian ini bertujuan menemukan konfigurasi selubung bangunan yang dapat menurunkan temperatur udara dalam ruang saat bulan terdingin maupun mampu memaksimalkan penghawaan untuk mewujudkan kenyamanan termal.

4.2.2 Bulan terpanas

Bulan Oktober mewakili bulan terpanas di Surabaya periode tahun 2013 - 2017. Pada tahun 2017, rata-rata temperatur udara bulan Oktober adalah $29,8^{\circ}\text{C}$

dengan kelembaban 68%. Temperatur udara maksimum bulan Oktober adalah 35°C dan minimum 25°C. Gambar 4.9 menunjukkan rata-rata kondisi iklim per jam bulan Oktober 2017. Rata-rata temperatur udara berkisar 26 – 27,5°C saat pagi hari hingga pukul 07.00. Temperatur udara meningkat dan mencapai 33,6°C pada pukul 13.00. Sama seperti bulan Januari, peningkatan temperatur udara sejalan dengan peningkatan radiasi matahari. Radiasi matahari mulai meningkat pukul 05.00 dan mencapai puncaknya pukul 12.00, yaitu 0,395 kW/m². Nilai tersebut cukup jauh melebihi radiasi saat bulan terdingin. Berbeda dengan bulan Januari, temperatur udara dan *dew point temperature* berjarak cukup jauh menunjukkan rendahnya kelembaban udara.



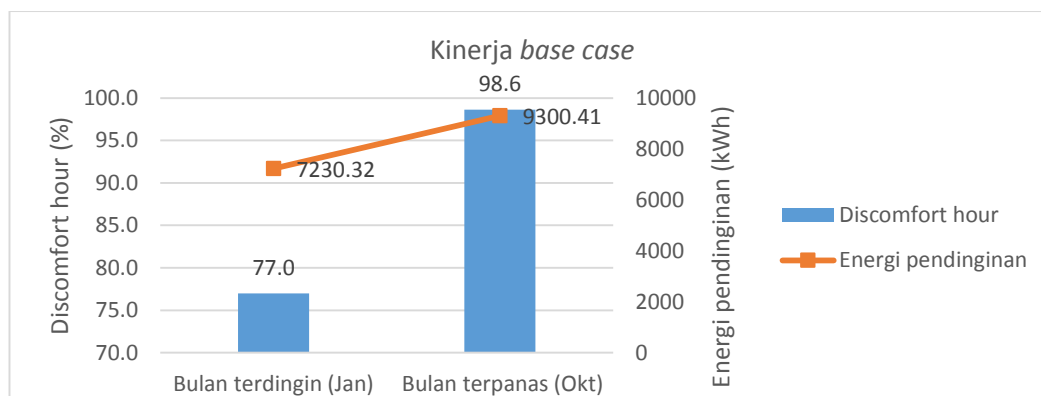
Gambar 4. 9 Rata-rata kondisi iklim per jam bulan Oktober 2017

Kondisi *outdoor* bulan Oktober selalu berada di luar rentang nyaman ASHRAE 55-2004 maupun SNI 6390-2011 selama waktu operasional. Kondisi nyaman dapat diwujudkan dengan bantuan angin dengan kecepatan hingga 1,8 m/s (*Building and Construction Authority*, 2010). Penelitian ini bertujuan menganalisis kemampuan tiap konfigurasi bangunan saat kondisi *outdoor* berada di luar zona nyaman.

4.3 Kinerja *base case*

Kinerja termal dan energi *base case* merupakan parameter model eksperimen. Oleh karena itu, dilakukan simulasi untuk mengetahui kondisi termal

objek studi (*base case*). Tabel 4.3 menunjukkan *input* untuk simulasi. *Base case* disimulasikan saat moda pasif (penghawaan alami) dan moda aktif (menggunakan AC) di bulan terdingin dan terpanas. Saat moda pasif, presentase waktu tidak nyaman saat di bulan terpanas (77%) lebih tinggi dibandingkan bulan terdingin (98,6%). Begitu pula saat moda aktif, energi pendinginan bulan terdingin lebih rendah 28,6% dibandingkan bulan terpanas seperti yang ditunjukkan gambar 4.10.



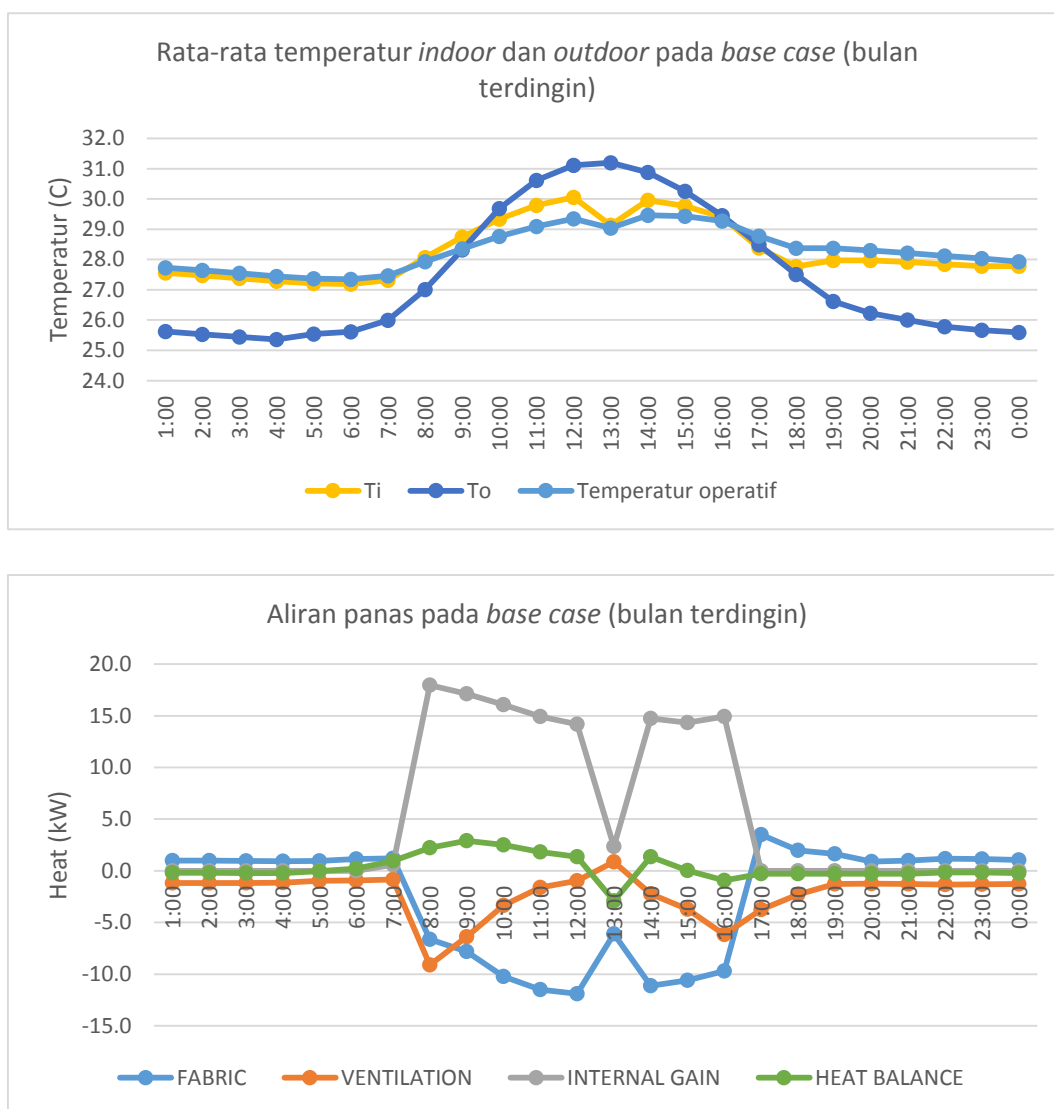
Gambar 4. 10 Kondisi *base case* saat bulan terdingin dan terpanas

Tabel 4. 3 *Input* simulasi

	Input simulasi	Sumber & keterangan
Okupansi	0,5523 orang/m ²	Metric handbook (1999)
Jadwal okupansi dan lampu	Weekdays only 08.00 – 12.00: 100% 12.00 – 13.00: 0% 13.00 – 16.00: 100% 16.00 – 08.00: 0%	Kelas digunakan pukul 08.00 – 12.00 dan 13.00 – 16.00. Lampu dinyalakan pukul 08.00 – 12.00 dan 13.00 – 16.00.
Metabolic	<i>Light office work</i> (120 W/orang) dengan faktor 0,9 (gabungan pria-wanita)	
Clothing	0,5	
Lighting	5 W/m ² – 100 Lux	Architectural Lighting Design (2002) dan SNI 03-6197 2011.
Cooling setpoint	25°C	SNI 6390 tahun 2011
Jenis AC	<i>Split (no fresh air)</i>	
Jadwal AC / NV	Weekdays only 08.00 – 16.00: 1 16.00 – 08.00: 0	Jadwal AC dinyalakan dan penghawaan alami digunakan

a. Moda pasif

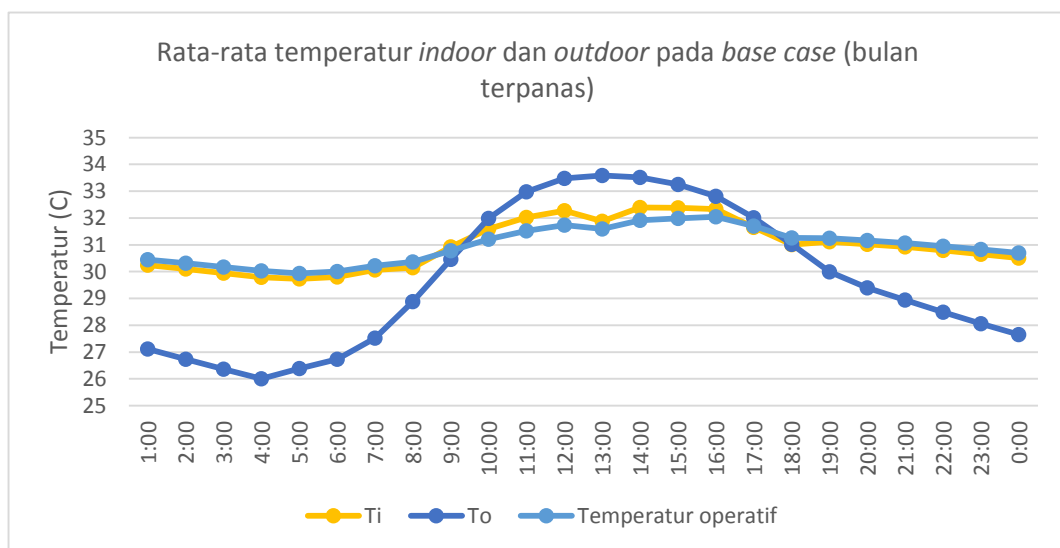
Gambar 4.11 menunjukkan grafik rata-rata temperatur udara dalam dan luar ruang saat moda pasif digunakan di bulan terdingin (Januari). Sebelum jam operasional, temperatur udara dalam ruang (T_i) selalu lebih tinggi 1,1 – 1,9°C dari luar ruang (T_o). Pada saat tersebut, jendela dan pintu dalam kondisi tertutup sehingga perpindahan panas melalui penghawaan cukup rendah. Panas yang berpindah ke lingkungan melalui selubung dan ventilasi mendekati 0 kW seperti yang ditunjukkan gambar 4.11.

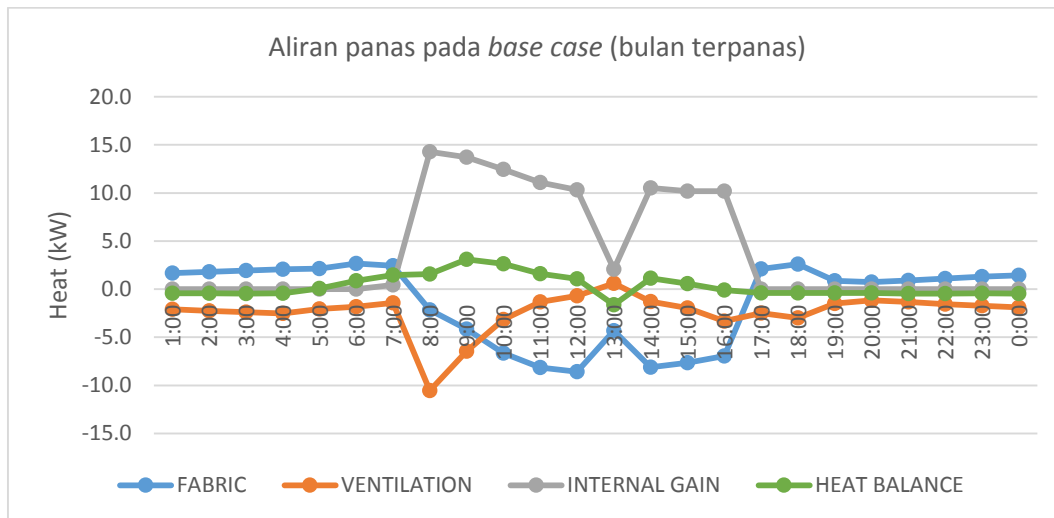


Gambar 4. 11 Grafik rata-rata aliran panas per jam *base case* saat moda pasif di bulan terdingin (Januari)

To mulai meningkat sejak pukul 05.00 pagi dan mencapai puncaknya pukul 13.00. Pukul 08.00, saat jendela dibuka, ventilasi berperan melepas panas. Karena perlahan To mendekati Ti, panas yang dilepas melalui ventilasi mulai berkurang. Puncaknya pukul 13.00, panas yang berpindah melalui ventilasi bernilai positif yang artinya panas masuk ke bangunan. Selisih To dan Ti saat pukul 10.00 – 16.00 mencapai 2,1°C. Berdasarkan grafik, kondisi temperatur operatif di luar rentang nyaman ASHRAE 55-2004 terlihat sejak pukul 09.00 hingga waktu operasional berakhir.

Pada bulan terpanas, sebelum waktu operasional, Ti lebih tinggi dari To gambar 4.12. To terus meningkat saat matahari mulai bersinar dan mencapai puncaknya pukul 12.00. Setelah pukul 07.00, To lebih tinggi dari Ti sehingga keseimbangan panas bangunan menunjukkan nilai positif (*heat gain*) yang berarti panas dari lingkungan berpindah ke bangunan. Selisih To dan Ti saat bulan terpanas lebih rendah dari bulan terdingin, mencapai 1,7°C. Hal ini menunjukkan kondisi termal luar dan dalam bangunan tidak berbeda jauh. Berdasarkan grafik, kondisi temperatur operatif selalu berada di luar rentang nyaman ASHRAE 55-2004 saat operasional. Hal ini yang mengakibatkan presentase waktu tidak nyaman di bulan terpanas lebih tinggi dari bulan terdingin. Penghawaan alami tidak dapat diandalkan untuk memenuhi kenyamanan termal di *base case*.





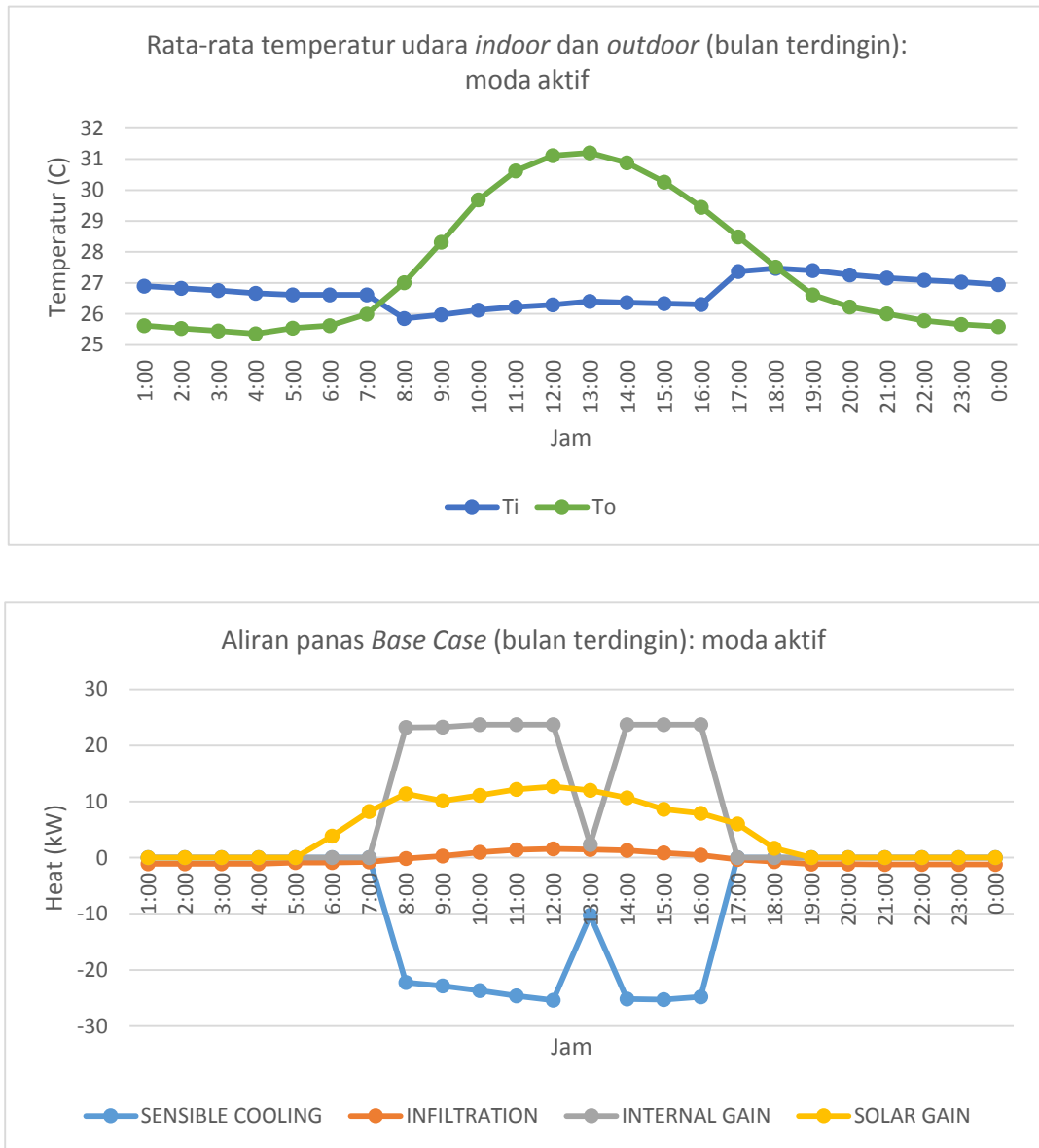
Gambar 4. 12 Grafik rata-rata aliran panas per jam *base case* saat moda pasif di bulan bulan terpanas (Oktober)

b. Moda aktif

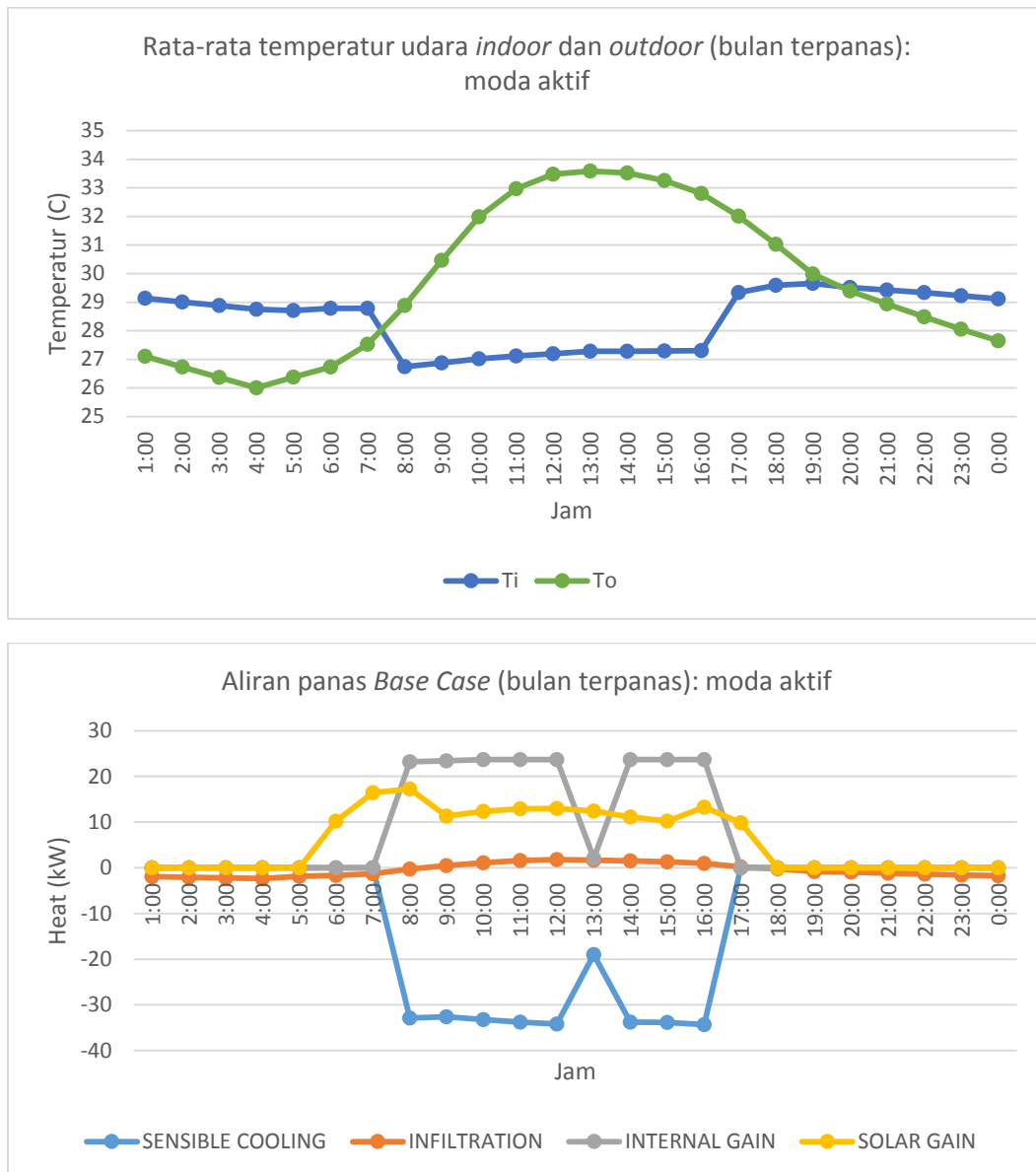
Sama dengan moda pasif, sebelum waktu operasional $T_i > T_o$ seperti yang ditunjukkan gambar 4.13. Mulai pukul 05.00, T_o meningkat seiring peningkatan radiasi matahari yang diterima bangunan. Pukul 08.00, kelas mulai digunakan sehingga terdapat panas internal. Pada saat yang sama, AC aktif dan temperatur udara dalam ruang cenderung konstan antara 25 – 26°C. Selisih T_i dan T_o saat operasional adalah 1,16 – 4,82°C. Semakin banyak temperatur yang harus diturunkan, semakin banyak panas yang perlu dilepas oleh AC sehingga energi pendinginan meningkat. Panas yang harus dilepas atau *sensible cooling* merupakan akumulasi panas internal, panas yang diterima selubung bangunan, dan panas oleh infiltrasi.

Pada bulan terpanas, rata-rata temperatur udara per jam lebih tinggi dari bulan terdingin. Sebelum jam operasional, T_i 28,7 – 29,1°C sementara T_o antara 26 – 27,5°C seperti yang ditunjukkan gambar 4.14. Semakin siang, T_o meningkat dan mencapai puncaknya pukul 13.00. Mulai pukul 08.00, AC aktif sehingga T_i stabil di kisaran 26,7 – 27,3°C. Selisih antara T_i dan T_o bervariasi antara 2,14 – 6,3°C. Jumlah tersebut lebih besar dari bulan terdingin. Artinya energi yang dibutuhkan mesin AC untuk melepas panas lebih besar saat bulan terpanas. Beban panas yang

harus dilepas bangunan ke lingkungan saat bulan terpanas lebih tinggi 8,6 – 10,6 kWh. Salah satu yang mempengaruhinya adalah penerimaan panas oleh radiasi matahari saat bulan terpanas lebih tinggi hingga 8,6 kWh.



Gambar 4. 13 Grafik rata-rata aliran panas per jam *base case* saat moda aktif di bulan terdingin (Januari)



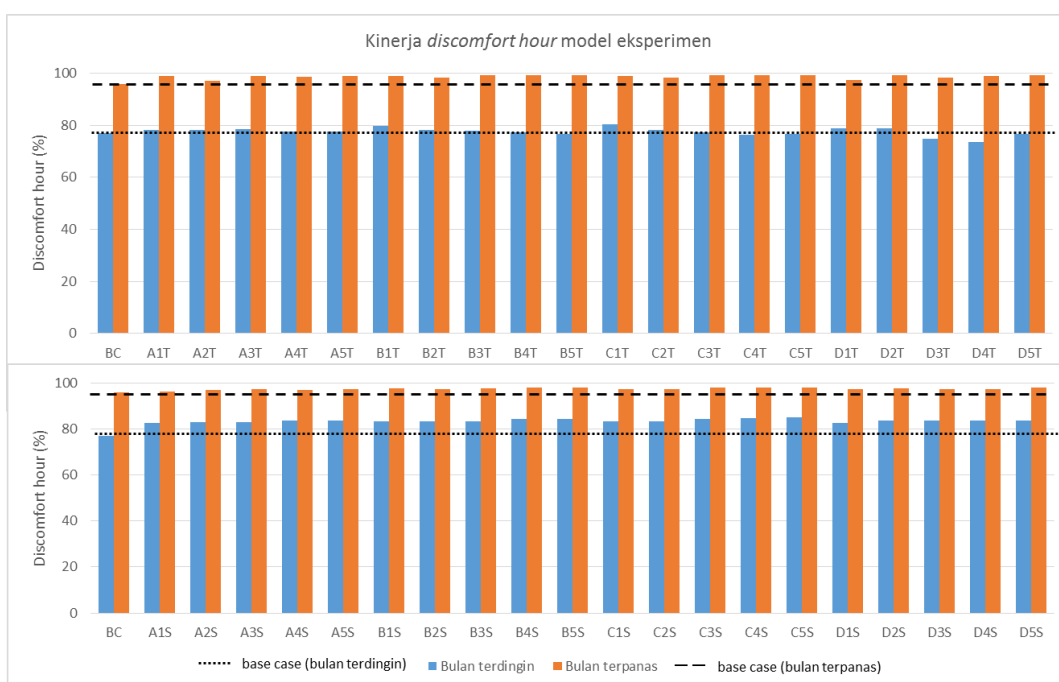
Gambar 4. 14 Grafik rata-rata aliran panas per jam *base case* saat moda aktif di bulan terpanas (Oktober)

4.4 Kinerja model eksperimen

4.4.1 Moda pasif

Gambar 4.15 menunjukkan kinerja *discomfort hour* model eksperimen. Presentase waktu tidak nyaman terendah ditemukan pada model D4T (73,6%) sementara waktu tidak nyaman tertinggi C5S (85,2%). Gambar 4.16 menunjukkan grafik rata-rata temperatur udara dalam (Ti) dan luar ruang (To) pada D4T (model dengan *discomfort hour* terendah). Di luar jam operasional, Ti selalu lebih tinggi

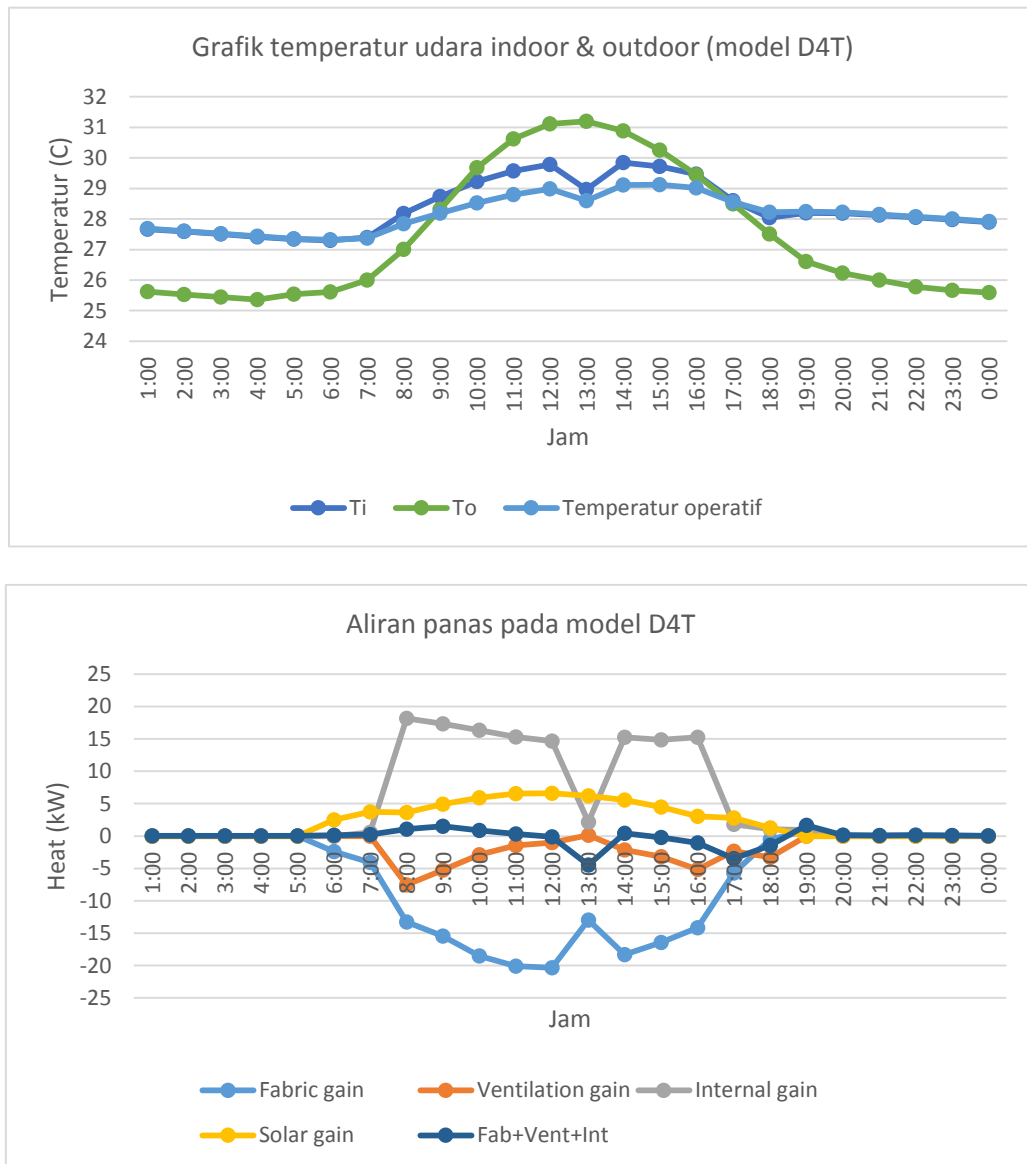
dibandingkan T_o 0,1 – 2,2°C. Panas yang berpindah melalui selubung dan ventilasi mendekati 0 kW. T_o mulai meningkat sejak pukul 05.00 pagi akibat radiasi matahari yang juga meningkat. Hal ini ditunjukkan dengan nilai penerimaan panas matahari oleh bangunan yang juga meningkat sejak pukul 05.00. Pada saat yang sama, selubung bangunan mulai melepas panas karena $T_i > T_o$. Pukul 08.00, saat jendela dibuka, ventilasi berperan melepas panas. T_o mendekati T_i dan melebihinya pukul 10.00. Puncaknya pukul 13.00, panas yang berpindah melalui ventilasi bernilai positif yang artinya panas masuk ke bangunan. Rata-rata temperatur udara saat operasional adalah 28,18 – 29,85°C. Temperatur operatif model D4T berada di luar zona nyaman di atas pukul 09.00 hingga waktu operasional berakhir.



Gambar 4. 15 Kinerja *discomfort hour* model eksperimen

Pada model C5S dengan *discomfort hour* tertinggi, sebelum waktu operasional, T_i lebih tinggi dari T_o seperti yang ditunjukkan gambar 4.17. Mulai pukul 05.00, penerimaan radiasi matahari oleh bangunan mulai meningkat dan mencapai puncaknya pukul 12.00. T_o terus meningkat seiring peningkatan radiasi matahari. Pukul 07.00, $T_o > T_i$ karena selubung bangunan melepaskan panas. Pukul 08.00, akumulasi perpindahan panas internal, penghawaan, dan selubung bangunan bernilai positif yang artinya *heat gain* atau panas dari lingkungan berpindah ke

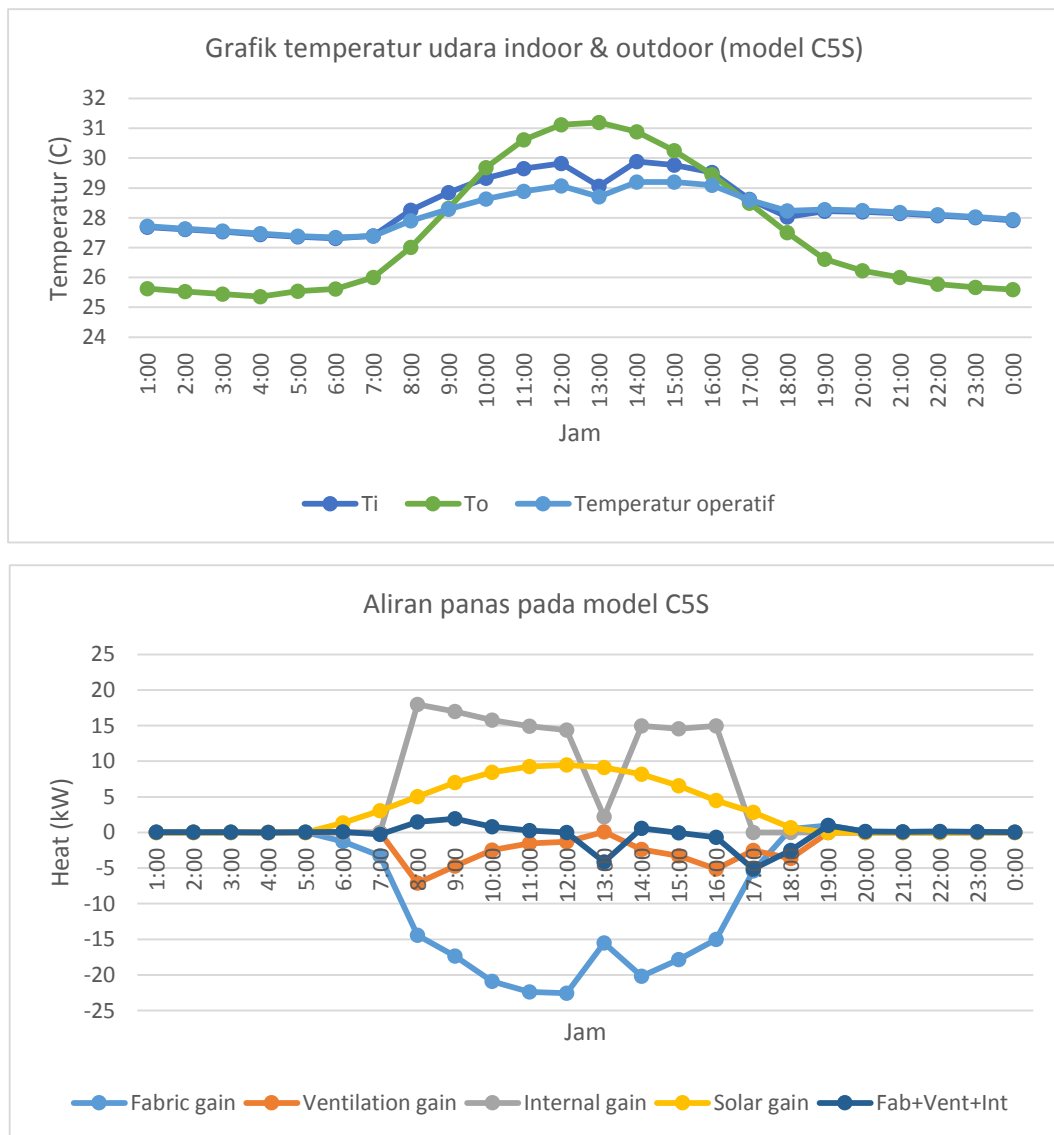
bangunan. Rata-rata temperatur udara saat operasional adalah 28,25 – 29,9°C. Sama seperti D4T, temperatur operatif model C5S berada di luar zona nyaman di atas pukul 09.00 hingga waktu operasional berakhir.



Gambar 4. 16 Grafik aliran panas pada model D4T

Beberapa faktor yang mempengaruhi perbedaan presentase waktu tidak nyaman pada model D4T dan C5S adalah penerimaan radiasi matahari oleh jendela dan pelepasan panas oleh penghawaan. Grafik di atas menunjukkan rata-rata radiasi matahari yang diterima C5S mencapai 9,47 kW pukul 12.00. Radiasi matahari yang diterima D4T lebih rendah, hanya 6,59 kW. Meskipun menghadap Timur-Barat,

luas jendela model D4T lebih kecil dari C5S sehingga radiasi yang diterima juga lebih rendah. Tabel 4.4 menunjukkan total radiasi matahari yang diterima C5S saat bulan terdingin mencapai 2306,83 kWh sementara D4T hanya menerima 1729,17 kWh. Selain itu, dari grafik rata-rata per jam, pelepasan panas melalui ventilasi pada C5S mencapai -7,1 kW. Nilai tersebut sedikit lebih rendah dari D4T, -7,5 kW. Total pelepasan panas dalam bulan terdingin oleh model D4T sedikit lebih tinggi, yaitu -743,7 kWh, dari C5S (-740,9 kWh). *Discomfort hour* pada C5S lebih tinggi karena dengan pelepasan panas oleh ventilasi yang tidak jauh berbeda, radiasi matahari yang diterima jauh lebih besar.



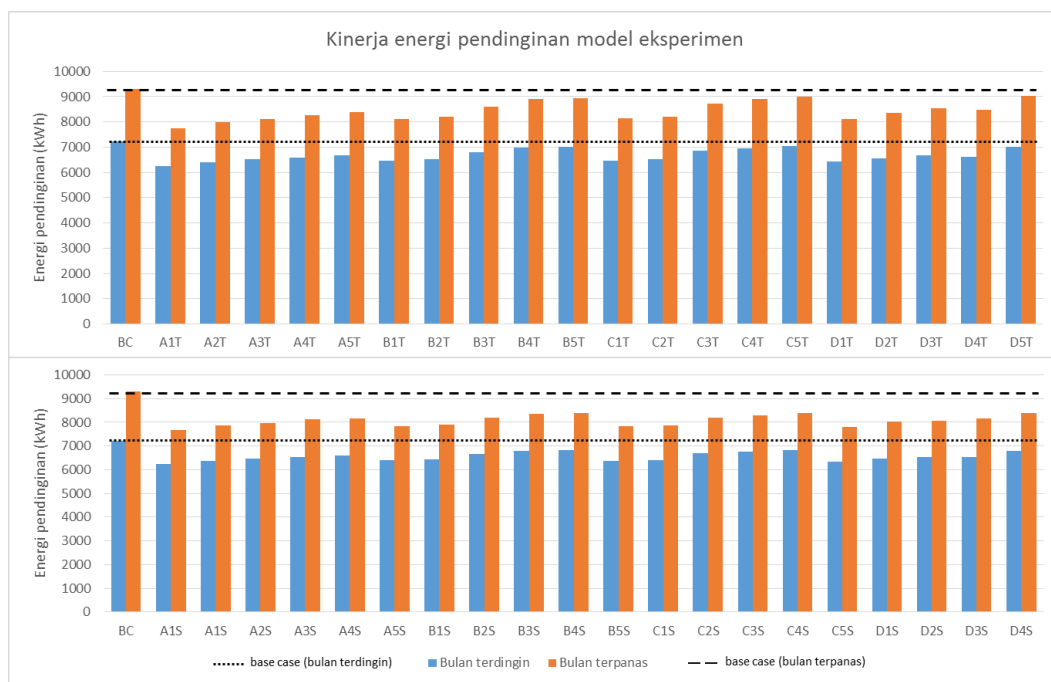
Gambar 4. 17 Grafik aliran panas model C5S

Tabel 4. 4 Perbandingan karakter model A1S dan C5T

	Ori	Total solar gain (kWh)	Total ventilation gain (kWh)	Discomfort hour (%)
C5S	180 ⁰	2306.83	-740.9	85,2
D4T	90 ⁰	1729.17	-743.7	73,6

4.4.2 Moda aktif

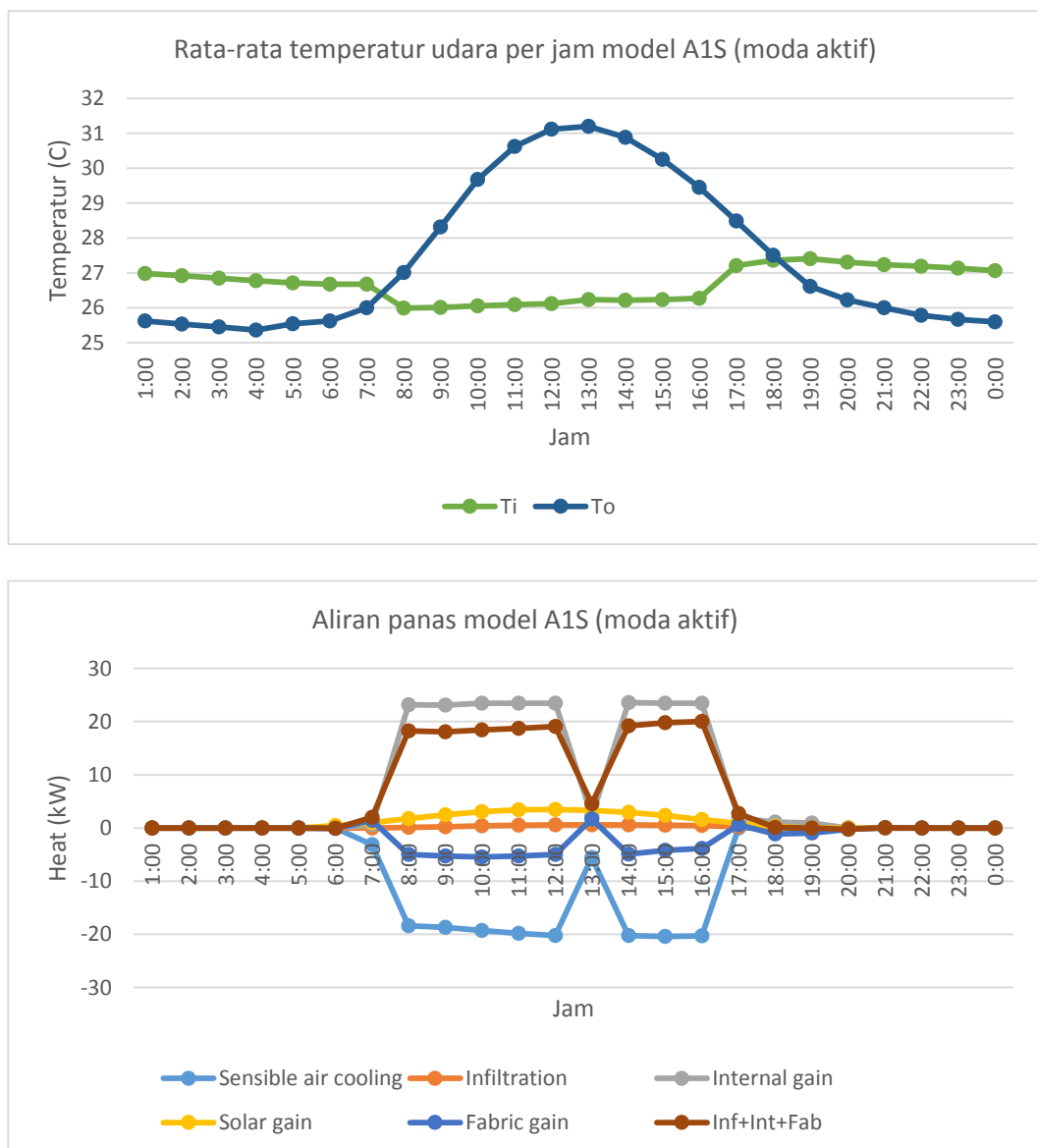
Gambar 4.18 menunjukkan kinerja energi pendinginan semua model eksperimen. Energi pendinginan yang dibutuhkan di bulan terpanas selalu meningkat 23,4 – 28,7% dibandingkan bulan terdingin. Energi pendinginan terendah ditemukan pada model A1S yaitu 6233,3 dan 7662,8 kWh saat bulan terdingin dan terpanas. Sementara energi pendinginan tertinggi ditemukan pada C5T saat bulan terdingin (7029,7 kWh) dan D5T saat bulan terpanas (9036,1 kWh).



Gambar 4. 18 Kinerja energi pendinginan model eksperimen

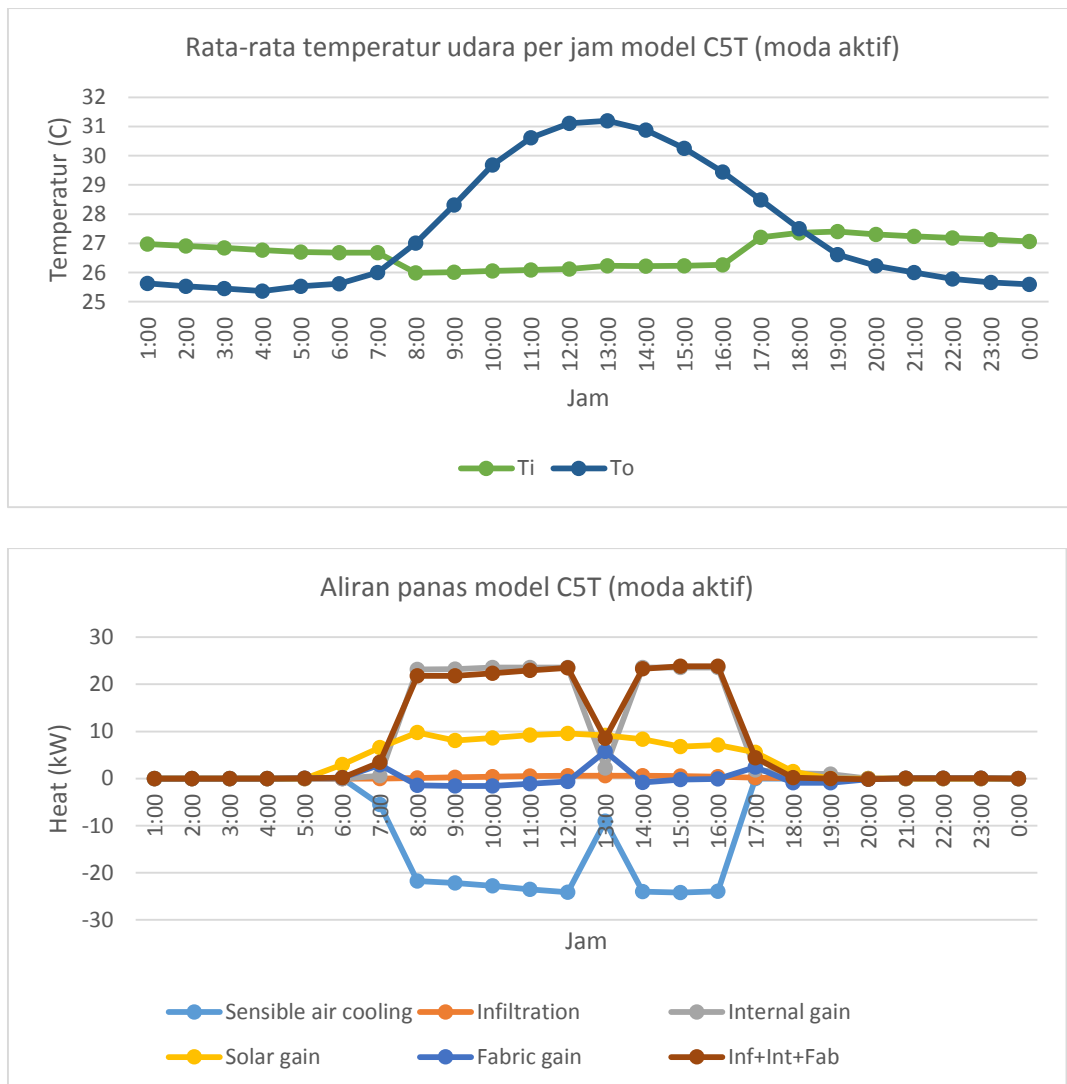
Gambar 4.19 menunjukkan rata-rata temperatur udara dan aliran panas per jam pada model A1S mewakili kondisi dengan energi pendinginan terendah. Sebelum jam operasional, $T_i > T_o$. Pada kondisi tersebut, akumulasi panas yang berpindah melalui selubung bangunan maupun ventilasi bernilai negatif,

menurunkan panas keluar dari bangunan. To meningkat seiring peningkatan radiasi matahari yang diterima bangunan. Saat jam operasional, Ti cenderung konstan karena AC aktif. Beban panas yang harus dilepas mesin AC untuk mendinginkan bangunan merupakan akumulasi panas internal, panas dari selubung, dan infiltrasi. Akumulasi tersebut bernilai positif yang berarti bangunan kelebihan panas 4,6 – 20,1 kWh. Jumlah panas tersebut harus dikeluarkan oleh mesin AC (*heat loss*) atau disebut *sensible air cooling*.



Gambar 4. 19 Grafik aliran panas model A1T

Model C5T membutuhkan energi pendinginan dalam terbesar dibandingkan *base case*. Pola perpindahan panas pada model C5T sama dengan A1S (gambar 4.20). Perbedaan yang mengakibatkan kedua model memiliki energi pendinginan yang berbeda adalah radiasi matahari yang diterima. Model C5T menerima rata-rata radiasi matahari 1,45 – 9,77 kW sementara A1S menerima 0,26 – 3,47 kW. Total radiasi matahari yang diterima C5T dalam bulan terdingin lebih besar 1994,4 kWh dari A1S seperti yang ditunjukkan Tabel 4.5. Faktor yang mempengaruhinya adalah luas jendela. Jendela pada model C5T lebih luas 100% dari A1S. Faktor orientasi juga berperan dimana model A1S memiliki sisi panjang menghadap Utara-Selatan sementara sisi panjang model C5T menghadap Timur-Barat.



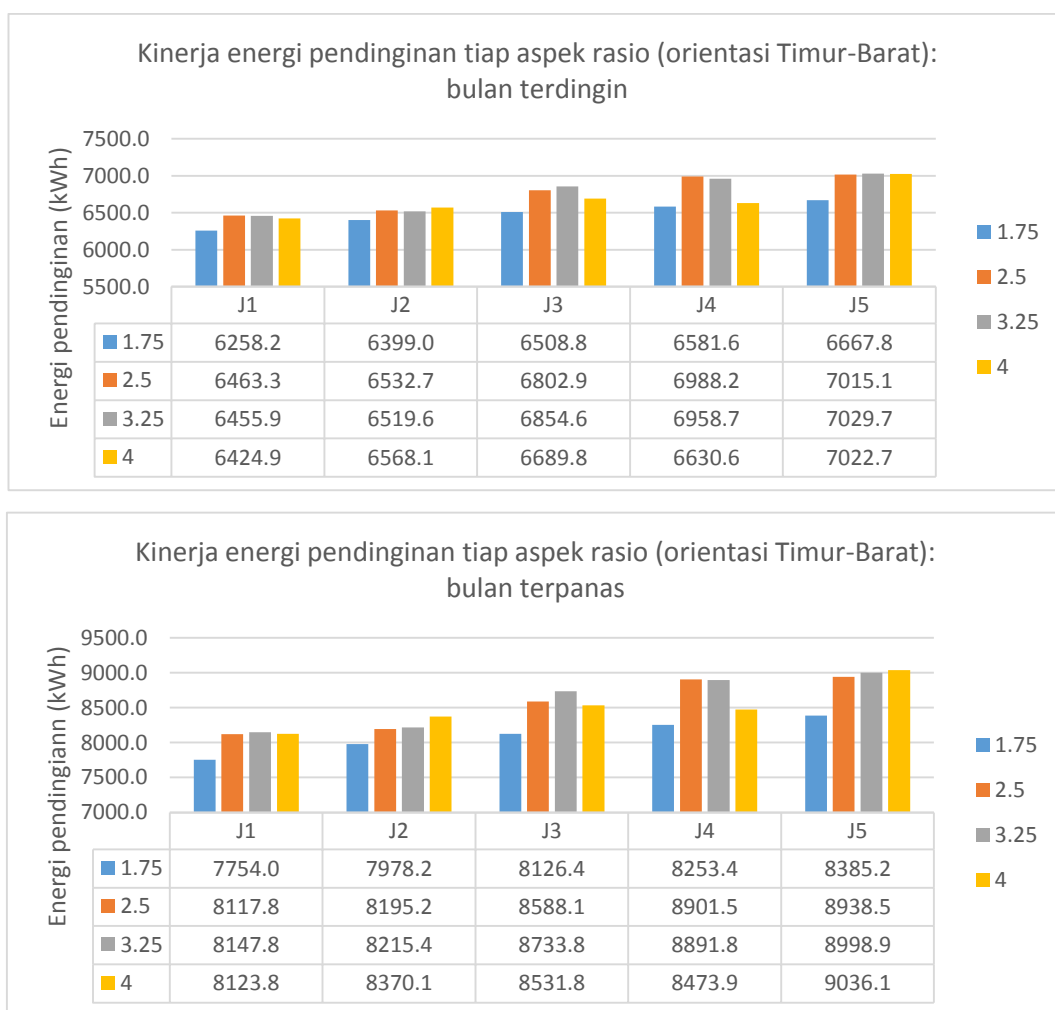
Gambar 4. 20 Grafik aliran panas model C5T

Tabel 4. 5 Perbandingan karakter model A1S dan C5T

	Ori	Luas jendela (m ²)	Total solar gain (kWh)	Total sensible cooling (GJ)	Energi pendinginan (kWh)
A1S	180 ⁰	34.6	820.2	-13.2	6233.3
C5T	90 ⁰	69.1	2814.6	-15.95	7029.7

4.5 Kinerja energi pendinginan pada model dengan aspek rasio berbeda

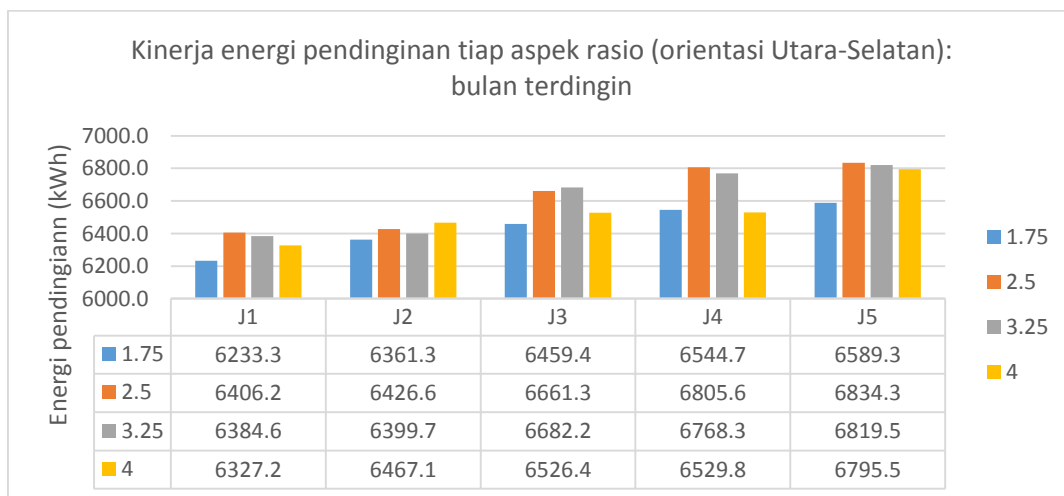
Kinerja bangunan saat memanfaatkan penghawaan mekanis (AC) dievaluasi dengan indikator energi pendinginan. Energi pendinginan menunjukkan energi yang dibutuhkan untuk menghadirkan kondisi nyaman dengan bantuan AC dalam satuan kWh. Kinerja energi pendinginan tiap aspek rasio untuk orientasi Timur-Barat ditunjukkan oleh gambar 4.21.

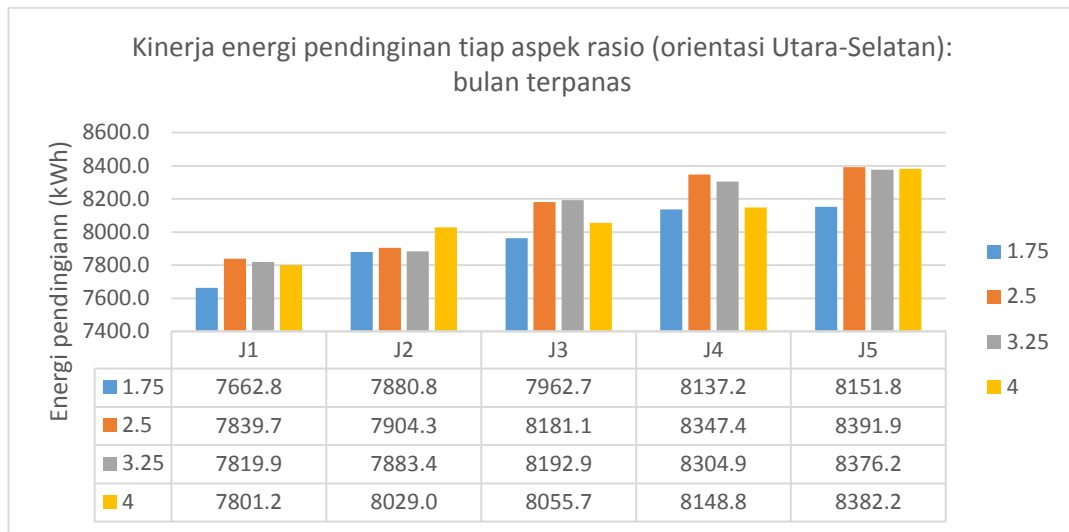


Gambar 4. 21 Kinerja energi pendinginan tiap aspek rasio (orientasi Timur-Barat)

Pada semua luas jendela, aspek rasio 1,75 memiliki kebutuhan energi pendinginan terendah. Sementara kinerja terburuk (kebutuhan energi tertinggi) terlihat pada model dengan aspek rasio 2,5 dan 3,25. Pada J1, J2, dan J4, peningkatan aspek rasio dari 1,75 menjadi 2,5 meningkatkan energi pendinginan. Namun, peningkatan aspek rasio di atas 2,5 menurunkan energi pendinginan. Pada J3, peningkatan aspek rasio dari 1,75 menjadi 3,25 meningkatkan energi pendinginan sebesar 5,3% saat bulan terdingin dan 7,5% saat bulan terpanas. Perubahan dari 3,25 menjadi 4 menurunkan energi pendinginan sebesar 2,4% dan 2,3% masing-masing saat bulan terdingin dan terpanas. Pada J5, peningkatan aspek rasio di atas 2,5 menghasilkan nilai energi pendinginan yang cenderung konstan. Hal ini menunjukkan perubahan aspek rasio pada bangunan dengan J5 tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap energi pendinginan yang dibutuhkan.

Kinerja energi pendinginan tiap aspek rasio untuk orientasi Utara-Selatan ditunjukkan oleh gambar 4.22. Kebutuhan energi pendinginan terendah tetap ditemukan pada model dengan aspek rasio 1,75. Pada J1, J4, dan J5, peningkatan aspek rasio dari 1,75 menjadi 2,5 meningkatkan energi pendinginan 2,8 – 4% saat bulan terdingin dan 2,3 – 2,9% saat bulan terpanas. Peningkatan aspek rasio di atas 2,5 menurunkan energi pendinginan. Sama seperti orientasi Timur-Barat, dengan J3, peningkatan aspek rasio dari 1,75 menjadi 3,25 meningkatkan energi pendinginan sebesar 3,5% saat bulan terdingin dan 2,9% saat bulan terpanas. Sementara perubahan dari 3,25 menjadi 4 menurunkan energi pendinginan sebesar 2,3% dan 1,7% masing-masing saat bulan terdingin dan terpanas.





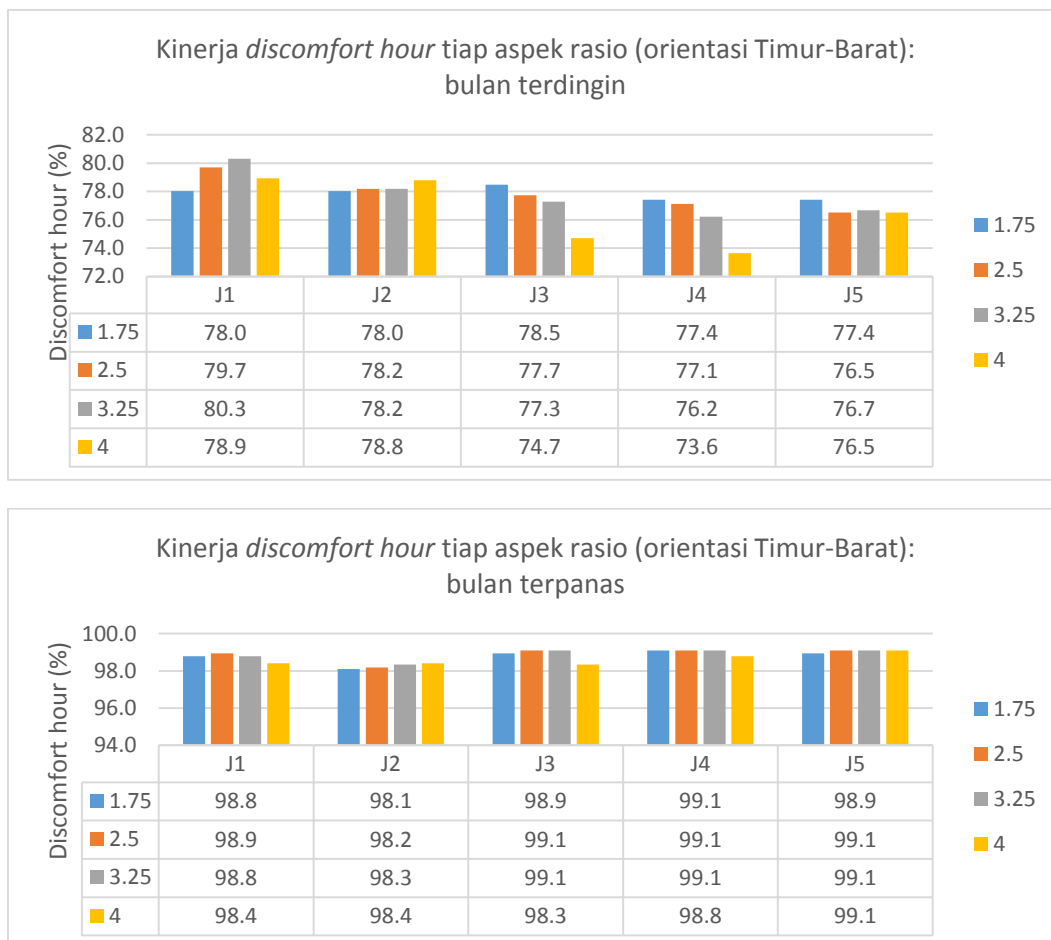
Gambar 4. 22 Kinerja energi pendinginan tiap aspek rasio (orientasi Utara-Selatan)

Panas yang diterima selubung mempengaruhi kebutuhan energi pendinginan (Juwana, 2005). Semakin luas selubung bangunan, semakin besar perpindahan panas yang terjadi (Markus & Morris, 1980). Pada iklim tropis, umumnya temperatur udara luar lebih tinggi dari dalam ruang sehingga panas dari lingkungan berpindah ke bangunan (Hyde, 2007). Oleh karena itu, semakin besar luas permukaan bangunan, semakin besar energi pendinginan yang diperlukan. Hal ini terlihat pada hasil eksperimen meskipun model dengan aspek rasio 4 memiliki energi pendinginan yang rendah saat luas jendela J3 dan J4. Peningkatan aspek rasio dengan luas jendela tetap, menurunkan WWR (*Window to Wall Ratio*). Pada J3, misalnya, WWR berkurang dari 41,5% pada aspek rasio 1,75 menjadi 27% pada aspek rasio 4. Beberapa peneliti seperti Cheung dkk (2005), Eskin dan Turkmen (2008), serta Lau dkk (2016) melaporkan peningkatan WWR dapat meningkatkan kebutuhan energi pendinginan. Hasil penelitian ini menunjukkan energi pendinginan dapat berkurang meskipun aspek rasio bertambah karena WWR berkurang. Hal tersebut menunjukkan pengaruh luas jendela lebih signifikan dibanding aspek rasio. Analisis lebih lanjut dibahas pada bab 5.

4.6 Kinerja *discomfort hour* pada model dengan aspek rasio berbeda

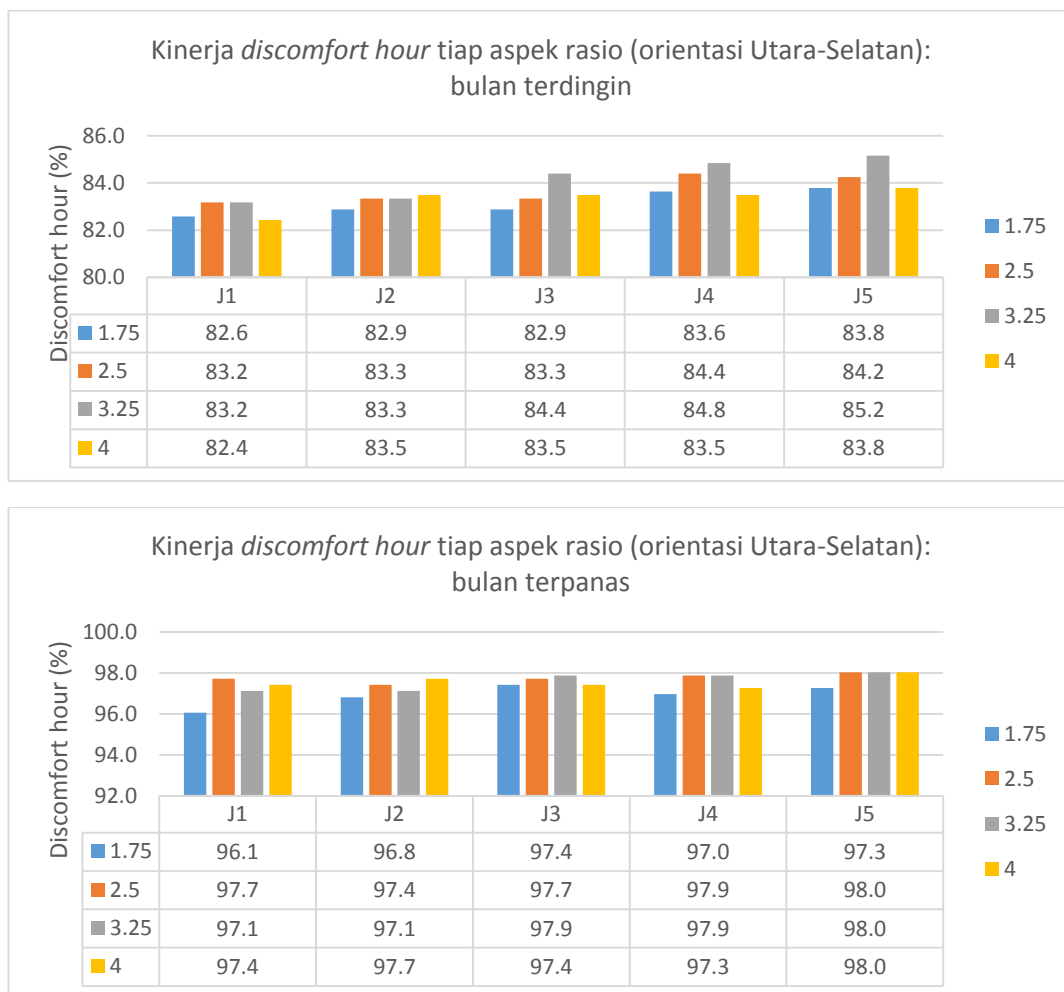
Kinerja bangunan saat memanfaatkan penghawaan alami dievaluasi dengan indikator *discomfort hour*. Kondisi nyaman dalam studi ini didasarkan pada standar

ASHRAE 55-2004 dengan indikator temperatur operatif dan kelembaban. Gambar 4.23 menunjukkan kinerja *discomfort hour* tiap aspek rasio pada model dengan orientasi Timur-Barat. Saat bulan terdingin, pada J1 dan J2, presentase waktu tidak nyaman terendah ditemukan pada model dengan aspek rasio 1,75. Sementara pada J3, J4, dan J5, presentase waktu tidak nyaman terendah ditemukan pada model dengan aspek rasio 4. Peningkatan aspek rasio pada model J1 dan J2 mengakibatkan peningkatan waktu tidak nyaman (*discomfort hour*) 0,2 – 2,1%. Sementara pada J3 dan J4 peningkatan aspek rasio dapat menurunkan *discomfort hour* 0,2 – 3,4%. Pada J5, peningkatan aspek rasio di atas 2,5 tidak mempengaruhi kenyamanan termal secara signifikan. Saat bulan terpanas, *discomfort hour* cenderung stagnan, selalu berada di atas 98%. Hal ini menunjukkan penghawaan alami tidak dapat diandalkan untuk menghadirkan kenyamanan termal saat bulan terpanas. Kinerja aspek rasio tidak terlalu signifikan saat bulan terpanas.



Gambar 4. 23 Kinerja *discomfort hour* tiap aspek rasio (orientasi Timur-Barat)

Pola berbeda terlihat pada model dengan orientasi Utara-Selatan seperti yang ditunjukkan gambar 4.24. Saat bulan terdingin, selain J2, peningkatan aspek rasio dari 1,75 menjadi 3,25 pada semua luas jendela meningkatkan *discomfort hour*. Sementara peningkatan aspek rasio dari 3,25 menjadi 4 menurunkan presentase waktu tidak nyaman. Pada J2, peningkatan aspek rasio mengakibatkan peningkatan *discomfort hour*. Sama dengan orientasi Timur-Barat, saat bulan terpanas nilai *discomfort hour* sangat tinggi, di atas 96%. Kinerja antar aspek rasio tidak terlalu signifikan saat bulan terpanas.



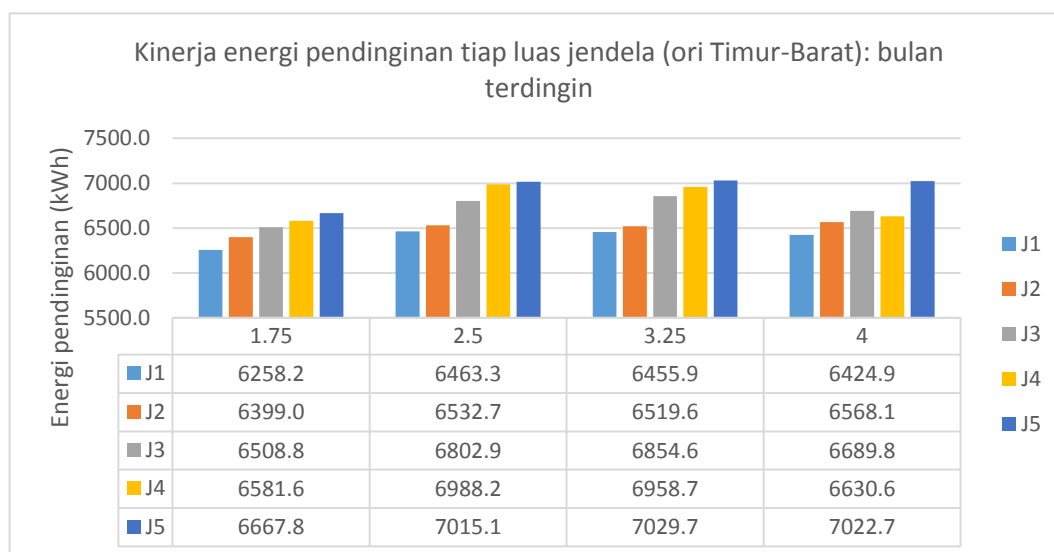
Gambar 4. 24 Kinerja *discomfort hour* tiap aspek rasio (orientasi Utara-Selatan)

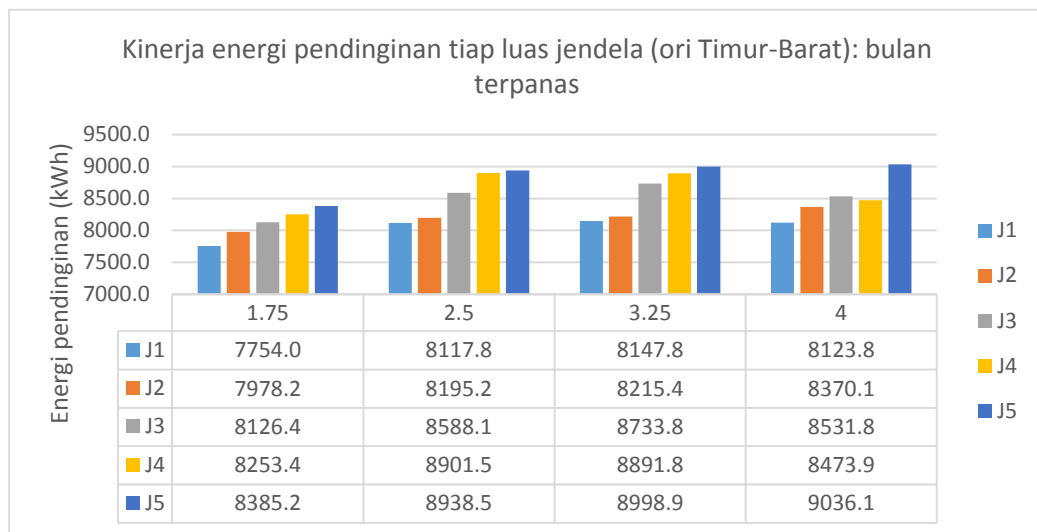
Seperti pembahasan sebelumnya, peningkatan luas selubung bangunan meningkatkan panas yang berpindah dari lingkungan ke bangunan. Kondisi tersebut tentu meningkatkan temperatur udara dalam ruang sehingga berada di luar rentang

nyaman. Penambahan aspek rasio mengakibatkan kedalaman kelas berkurang dimana jarak antara *inlet* dan *outlet* menjadi dekat. Penghawaan silang akan efektif saat jarak *inlet* dan *outlet* tidak terlalu jauh atau melebihi 15 m (Liddament, 1996). Tidak hanya meningkatkan temperatur udara karena panas yang diterima bertambah, penambahan aspek rasio juga berpotensi meningkatkan penghawaan.

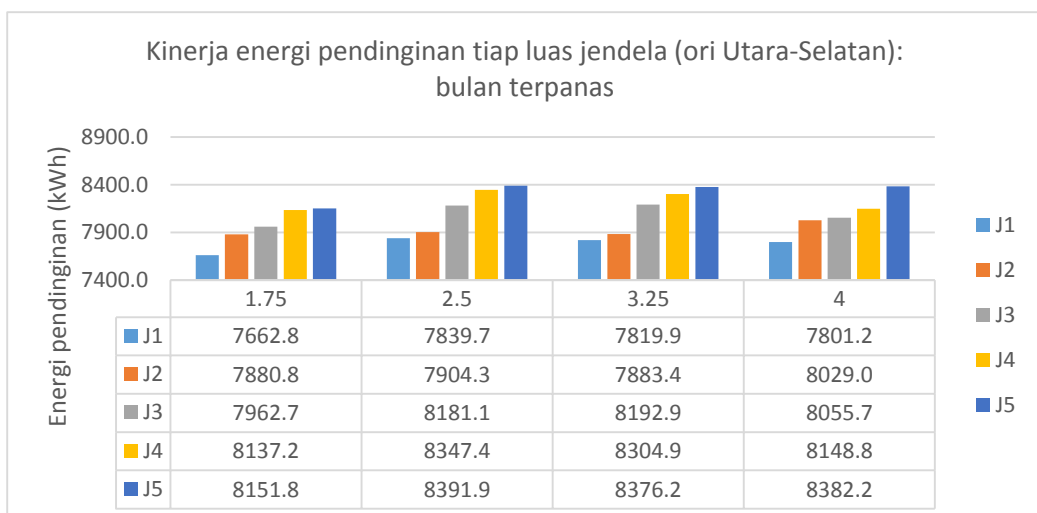
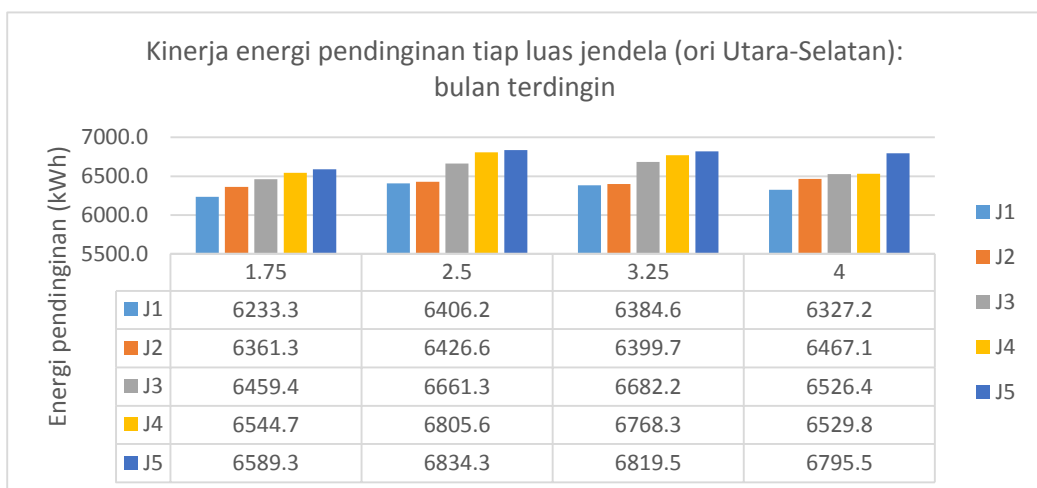
4.7 Kinerja energi pendinginan pada model dengan luas jendela berbeda

Gambar 4.25 menunjukkan kinerja energi pendinginan model dengan luas jendela berbeda untuk orientasi Timur-Barat. Peningkatan luas jendela berbanding lurus dengan peningkatan energi pendinginan pada semua aspek rasio, saat bulan terdingin maupun terpanas. Peningkatan berkisar antara 0,4 – 5,9% saat bulan terdingin dan 0,4 – 6,6% saat bulan terpanas. Peningkatan energi pendinginan terbesar terjadi pada model dengan aspek rasio 4 saat luas jendela meningkat dari J4 (60,5 m²) ke J5 (69,1 m²). Kinerja energi pendinginan tiap luas jendela untuk orientasi Utara-Selatan ditunjukkan pada gambar 4.26. Peningkatan luas jendela mengakibatkan peningkatan energi pendinginan sebesar 0,1 – 4,4% di bulan terdingin dan 0,2 – 3,9% di bulan terpanas. Peningkatan energi pendinginan terbesar terjadi pada model dengan aspek rasio 3,25 saat luas jendela meningkat dari J2 (43,2 m²) ke J3 (51,8 m²).





Gambar 4. 25 Kinerja energi pendinginan tiap luas jendela (orientasi Timur-Barat)

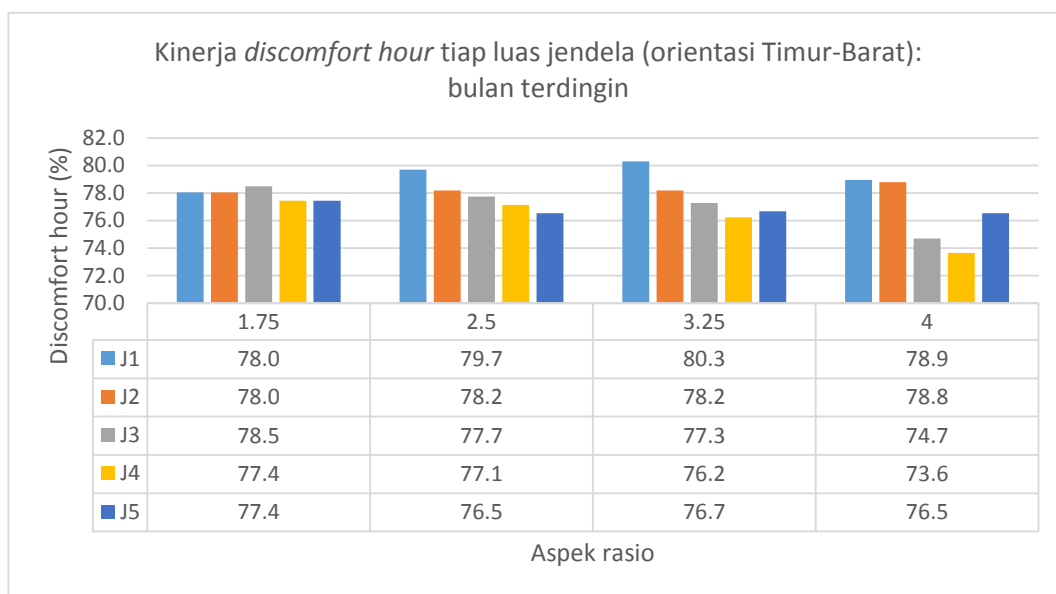


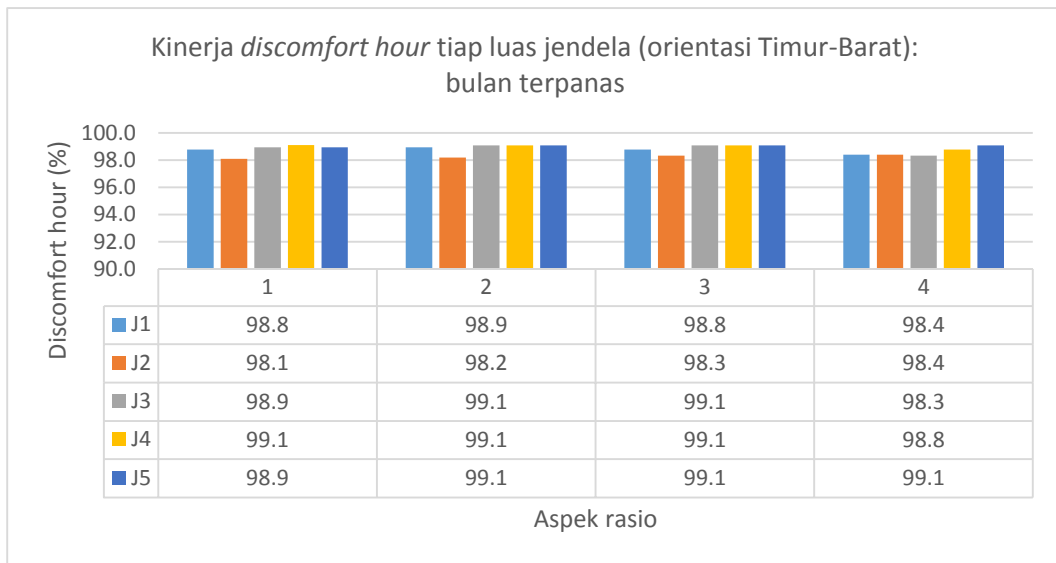
Gambar 4. 26 Kinerja energi pendinginan tiap luas jendela (orientasi Utara-Selatan)

Jendela, khususnya kaca, merupakan elemen bangunan dengan resistansi termal yang rendah dibandingkan elemen selubung bangunan lainnya (Fallah Tafti dan Mahdavi Nejad, 2015). Terdapat dua jenis aliran panas melalui jendela, akibat perbedaan temperatur dalam dan luar ruang serta radiasi matahari yang diterima (Markus dan Morris, 1980). Lu, Li, dan Zhao (2015) menyatakan perpindahan panas karena perbedaan temperatur jauh lebih kecil dari penerimaan panas radiasi matahari. Oleh karena itu, peningkatan energi pendinginan saat luas jendela bertambah diakibatkan bertambahnya radiasi matahari yang diterima. Pembahasan lebih lanjut dan *elemental breakdown* ditunjukkan di bab 5.

4.8 Kinerja *discomfort hour* pada model dengan luas jendela berbeda

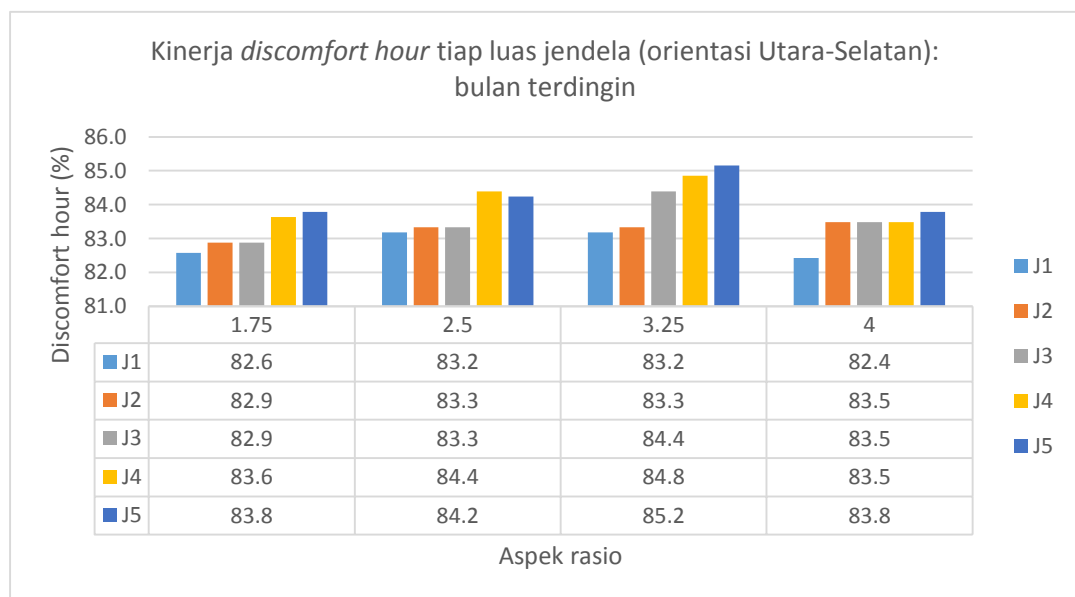
Kinerja *discomfort hour* pada model dengan luas jendela berbeda dan berorientasi Timur-Barat ditunjukkan pada gambar 4.27. Model dengan luas jendela terbesar (J5) memiliki kinerja termal terbaik pada aspek rasio 1,75 dan 3,25. Pada aspek rasio 2,5 peningkatan luas jendela mampu menurunkan presentase waktu tidak nyaman sebesar 0,6 -1,9%. Sementara pada aspek rasio 3,25 dan 4, kinerja termal terbaik saat moda pasif ditemukan pada model J3. Peningkatan luas jendela dari J1 hingga J4 mampu menurunkan *discomfort hour* 0,2 – 5,2%. Namun, peningkatan menjadi J5 dapat menambah *discomfort hour*. Saat bulan terpanas, pengaruh luas jendela terhadap *discomfort hour* tidak signifikan.

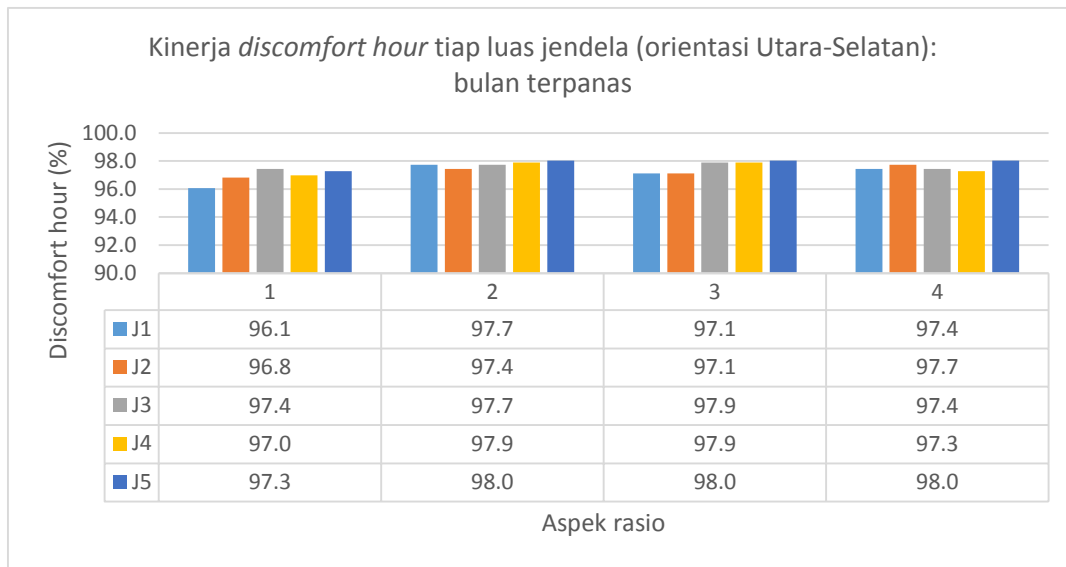




Gambar 4. 27 Kinerja *discomfort hour* tiap luas jendela (orientasi Timur-Barat)

Gambar 4.28 menunjukkan kinerja *discomfort hour* tiap luas jendela pada model dengan orientasi Utara-Selatan. Pada model dengan orientasi Utara-Selatan, peningkatan luas jendela dapat meningkatkan *discomfort hour* di semua aspek rasio. Kinerja termal terbaik ditemukan pada model dengan luas jendela terkecil (J1). Peningkatan terbesar terjadi pada aspek rasio 3,25 dimana peningkatan luas jendela dari J1 menjadi J4 meningkatkan *discomfort hour* sebesar 2,4%. Pengaruh luas jendela terhadap *discomfort hour* saat bulan terpanas tidak terlalu signifikan.





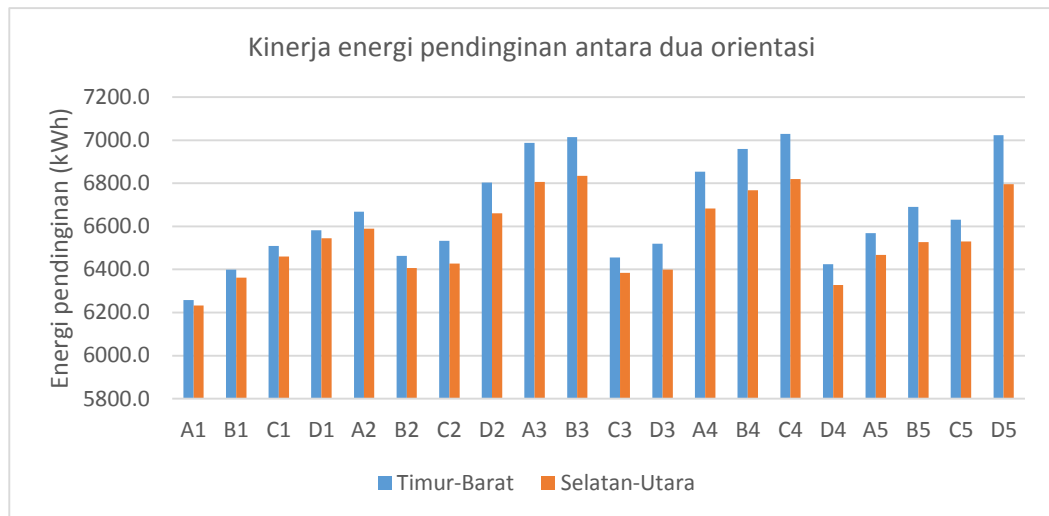
Gambar 4. 28 Kinerja *discomfort hour* tiap luas jendela (orientasi Utara-Selatan)

Pada bangunan berpenghawaan alami, peningkatan luas jendela tidak hanya meningkatkan penerimaan radiasi matahari tetapi juga meningkatkan potensi penghawaan (Liping & Hien, 2007; Longo, Melo, & Ghisi, 2011). Pada orientasi Timur-Barat, peningkatan luas jendela dapat menurunkan presentase waktu tidak nyaman. Namun, hal tersebut tidak berlaku pada model dengan orientasi Utara-Selatan. Liping dan Hien (2007) melaporkan peningkatan WWR tidak selalu dapat mengkompensasi peningkatan temperatur udara karena penambahan panas yang diterima (*heat gain*). Hal tersebut terjadi bila peningkatan panas yang diterima lebih signifikan dibandingkan peningkatan pelepasan panas. Analisis dan *elemental breakdown* akan dibahas pada bab 5.

4.9 Kinerja energi pendinginan pada model dengan orientasi berbeda

Energi pendinginan yang dibutuhkan model dengan orientasi Timur-Barat selalu lebih tinggi dari orientasi Utara-Selatan seperti gambar 4.29. Energi pendinginan model dengan orientasi Timur-Barat lebih tinggi 0,4 – 3,24% saat bulan terdingin dan 1,18 – 7,24% saat bulan terpanas. Perbedaan pada bulan terpanas lebih signifikan dibandingkan bulan terdingin. Pada model dengan aspek

rasio 1,75 perbedaan energi pendinginan cenderung rendah, yaitu 0,14 – 1,18% di bulan terdingin dan 1,18 – 2,78% di bulan terpanas.



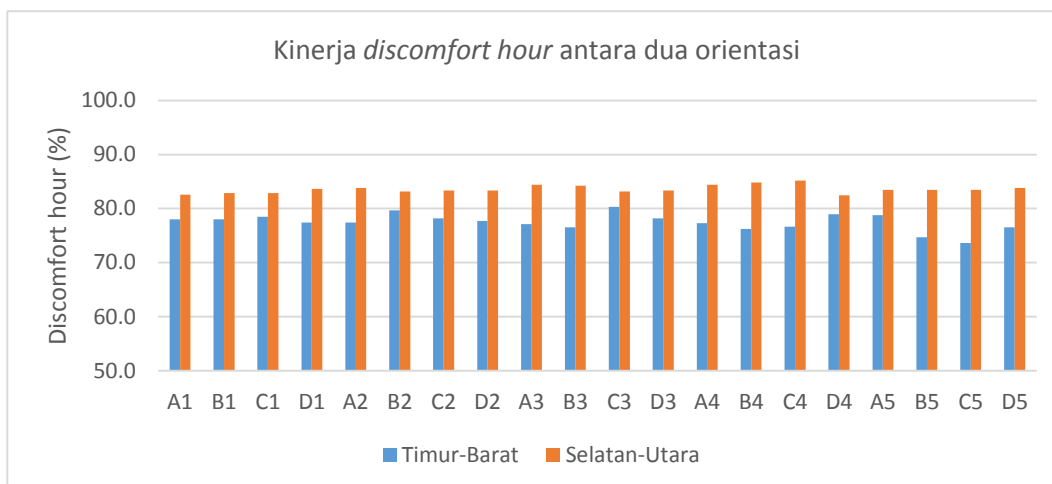
Gambar 4. 29 Kinerja energi pendinginan antara dua orientasi

Perbedaan orientasi mengakibatkan perbedaan jumlah dan durasi radiasi matahari yang diterima bangunan (Emuwa, 2016). Pada konteks iklim tropis, sisi Timur dan Barat menerima radiasi yang tinggi (Koenigsberger dkk, 1974). Oleh karena itu, model dengan sisi panjang menghadap Timur-Barat memiliki energi pendinginan yang tinggi. Pembahasan lebih lanjut dilakukan pada bab 5. Pengaruh orientasi tidak terlalu signifikan pada model dengan aspek rasio kecil karena semakin sedikit permukaan yang menutup suatu volume, semakin kecil pengaruh eksternal terhadap bangunan (Markus dan Morris, 1980). Orientasi berperan penting pada bangunan dengan aspek rasio tinggi atau memanjang (Ling, Ahmad, dan Ossen, 2007).

4.10 Kinerja *discomfort hour* pada model dengan orientasi berbeda

Gambar 4.30 menunjukkan model dengan orientasi Utara-Selatan memiliki *discomfort hour* yang lebih tinggi 3,6 – 13,4% dari model dengan orientasi Timur-Barat. Teori menyatakan bangunan dengan sisi panjang menghadap Timur-Barat menerima panas lebih tinggi (Koenigsberger dkk, 1974). Namun, pada konteks Surabaya, arah angin dengan frekuensi tersering adalah Timur-Barat. Angin dapat membantu mewujudkan kenyamanan termal dengan mengalirkan panas ke luar

bangunan (Liddament, 1996). Hal tersebut meningkatkan potensi penghawaan alami pada bangunan berorientasi Timur-Barat. Analisis lebih lanjut dilakukan pada bab 5.

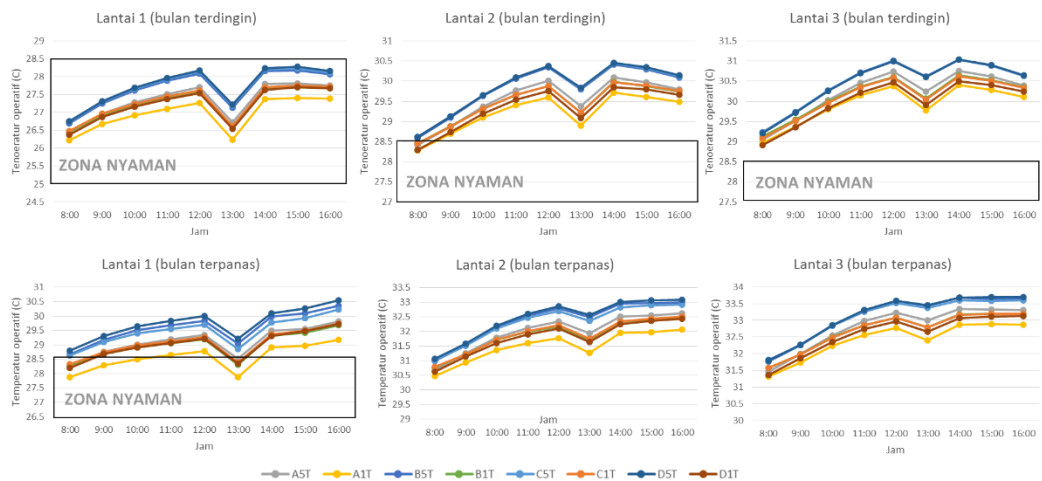


Gambar 4.30 Kinerja *discomfort hour* antara 2 orientasi

4.11 Faktor waktu terhadap penerapan strategi penghawaan hibrida

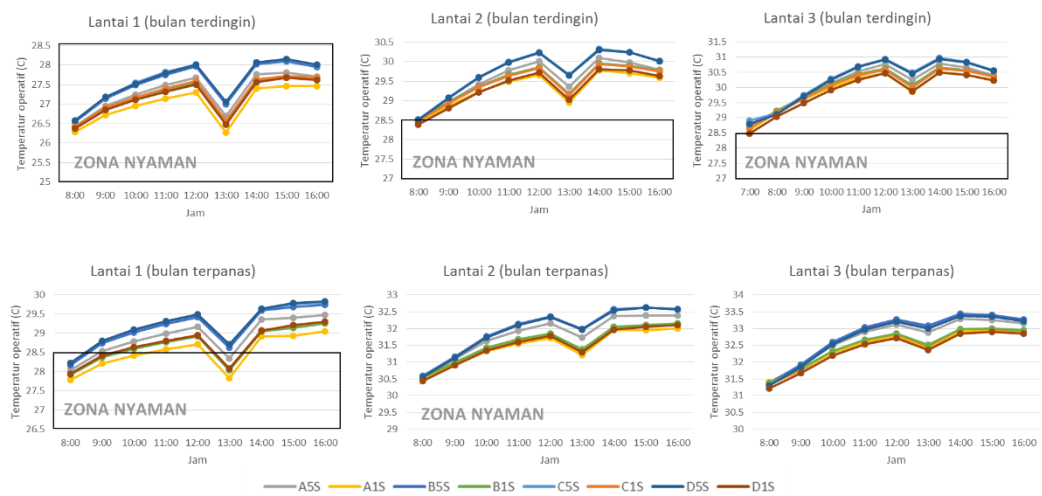
Berdasarkan rata-rata temperatur operatif per jam saat moda pasif, dirumuskan waktu yang sesuai untuk penerapan moda pasif dan aktif pada strategi penghawaan hibrida. Waktu yang sesuai untuk menerapkan moda pasif adalah saat temperatur operatif berada dalam rentang nyaman yang direkomendasikan ASHRAE 55-2004. Moda aktif disarankan saat kondisi temperatur operatif di luar zona nyaman.

Gambar 4.31 menunjukkan rata-rata temperatur operatif per jam model dengan orientasi Timur-Barat. Saat bulan terdingin, ruang kuliah di lantai 1 dapat memanfaatkan penghawaan alami secara penuh. Pembagian waktu pemanfaatan moda pasif dan aktif untuk lantai dua dapat dilihat pada tabel 4.6. Kondisi ruang kuliah di lantai 3 selalu berada di luar zona nyaman sehingga penggunaan AC disarankan penuh selama waktu operasional. Saat bulan terpanas, penggunaan penghawaan alami disarankan hingga pukul 08.00 – 10.00 bergantung luas jendela dan aspek rasio bangunan (Tabel 4.7). Sementara untuk lantai 2 dan 3, kondisi selalu berada di luar zona nyaman sehingga disarankan menggunakan AC.



Gambar 4. 31 Rata-rata temperatur operatif per jam (ori Timur-Barat)

Gambar 4.32 menunjukkan rata-rata temperatur operatif per jam model dengan orientasi Utara-Selatan. Saat bulan terdingin, ruang kuliah di lantai 1 dapat memanfaatkan penghawaan alami secara penuh. Ruang kuliah di lantai 2 dapat memanfaatkan penghawaan alami pada pukul 08.00 dan selanjutnya mengaktifkan AC. Kondisi ruang kuliah di lantai 3 selalu berada di luar zona nyaman sehingga penggunaan AC disarankan penuh selama waktu operasional. Saat bulan terpanas, penggunaan moda pasif dan aktif ditunjukkan pada tabel 4.8. Sementara untuk lantai 2 dan 3, kondisi selalu berada di luar zona nyaman sehingga disarankan menggunakan moda aktif (AC).



Gambar 4. 32 Rata-rata temperatur operatif per jam (ori Utara-Selatan)

Tabel 4. 6 Penggunaan moda pasif dan aktif untuk lantai 2 (orientasi Timur-Barat)

BULAN TERDINGIN (LT 2)								
	1,75		2,5		3,25		4	
	J1	J5	J1	J5	J1	J5	J1	J5
08.00								
09.00								
10.00								
11.00								
12.00								
13.00								
14.00								
15.00								
16.00								
keterangan: : moda pasif : moda aktif								

Tabel 4. 7 Penggunaan moda pasif dan aktif untuk lantai 1 (orientasi Timur-Barat)

BULAN TERPANAS (LT 1)								
	1,75		2,5		3,25		4	
	J1	J5	J1	J5	J1	J5	J1	J5
08.00								
09.00								
10.00								
11.00								
12.00								
13.00								
14.00								
15.00								
16.00								
keterangan: : moda pasif : moda aktif								

Tabel 4. 8 Penggunaan moda pasif dan aktif untuk lantai 1 (orientasi Utara-Selatan)

BULAN TERPANAS (LT 1)								
	1,75		2,5		3,25		4	
	J1	J5	J1	J5	J1	J5	J1	J5
08.00								
09.00								
10.00								
11.00								
12.00								

BULAN TERPANAS (LT 1)								
	1,75		2,5		3,25		4	
	J1	J5	J1	J5	J1	J5	J1	J5
13.00								
14.00								
15.00								
16.00								
keterangan:		: moda pasif				: moda aktif		

4.12 Rangkuman

Bab ini membahas kinerja model eksperimen saat moda pasif maupun aktif. Tiap model disimulasikan saat bulan terdingin (Januari) dan terpanas (Oktober) untuk mewakili kondisi terekstrim. Saat moda aktif, energi pendinginan terendah ditemukan pada model A1S (6233,3 kW) dan tertinggi pada C5T (7662,8 kW). Saat moda pasif, *discomfort hour* terendah ditemukan pada model D4T (73,6%) dan tertinggi pada C5S (85,2%).

Hasil eksperimen menunjukkan peningkatan energi pendinginan bervariasi antara 0,2 – 6,18% saat aspek rasio meningkat dari 1,75 menjadi 4 dengan interval 0,75. Hasil ini mem-*validasi* studi Inanici dan Demirbilek (2000) yang melaporkan perbaikan beban pendinginan 3 – 6% saat aspek rasio meningkat dari 1 ke 2 dengan interval 0,2. Perubahan aspek rasio tidak menunjukkan pola yang general terhadap kinerja energi pendinginan dan *discomfort hour*. Penambahan aspek rasio meningkatkan perpindahan panas pada luas selubung (Markus & Morris, 1980). Pada iklim tropis, temperatur udara luar ruang lebih tinggi dari dalam sehingga panas dari lingkungan berpindah ke bangunan (Hyde, 2007). Bangunan dengan luas selubung besar menerima panas lebih banyak. Di sisi lain, penambahan aspek rasio mengakibatkan kedalaman kelas berkurang sehingga jarak antara *inlet* dan *outlet* menjadi dekat dan penghawaan silang menjadi efektif.

Pengaruh luas jendela terlihat jelas dimana peningkatan luas jendela meningkatkan energi pendinginan. Hal ini karena radiasi matahari yang masuk melalui jendela berperan besar terhadap kinerja termal bangunan (Lu, Li, dan Zhao, 2015). Selain itu, perubahan luas jendela berpengaruh pada pelepasan panas melalui penghawaan. Penghawaan dapat meningkatkan kondisi termal dalam ruang (Longo,

Melo, dan Ghisi, 2011). Penambahan luas jendela 100% (J1 ke J5) meningkatkan energi pendinginan 5,7 – 11,2% bergantung orientasi dan waktu (bulan terpanas atau terdingin). Hasil ini sejalan dengan studi *Organization of American States* (2013) meskipun peningkatan yang terjadi tidak terlalu signifikan karena konteks bangunan bertingkat rendah dan berpeneduh.

Pengaruh orientasi juga terlihat jelas saat model dengan orientasi Timur-Barat memiliki energi pendinginan yang rendah namun *discomfort hour* yang tinggi dibandingkan orientasi Utara-Selatan. Peran orientasi penting karena perbedaan orientasi mengakibatkan perbedaan jumlah dan durasi radiasi matahari yang diterima bangunan (Emuwa, 2016). Selain itu, orientasi terhadap arah angin juga mempengaruhi efektivitas penghawaan (Aldawoud, 2016). Bab ini menjawab pertanyaan penelitian pertama mengenai pengaruh konfigurasi desain selubung bangunan terhadap kinerja termal dan energi meskipun pembahasan lebih lanjut dilakukan pada bab 5.

BAB 5

PEMBAHASAN HASIL EKSPERIMEN

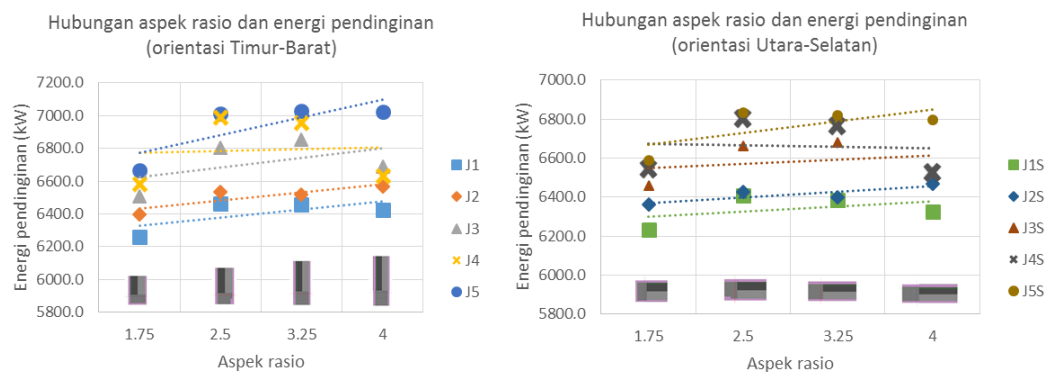
Pengaruh konfigurasi selubung bangunan (aspek rasio, luas jendela, dan orientasi) terhadap kinerja termal dan energi bangunan pendidikan dengan sistem penghawaan hibrida di iklim tropis lembab dibahas pada bab ini. Hasil eksperimen kemudian dipetakan pada kuadran evaluasi untuk menemukan konfigurasi selubung bangunan pendidikan yang memiliki kinerja termal dan energi terbaik dibandingkan *base case*.

5.1 Pengaruh aspek rasio pada kinerja bangunan berpenghawaan hibrida

Pengaruh aspek rasio terhadap kinerja termal bangunan berpenghawaan hibrida dianalisis saat moda pasif maupun aktif. Hubungan aspek rasio dan energi pendinginan saat moda aktif ditunjukkan pada gambar 5.1. Grafik menunjukkan pola perubahan aspek rasio terhadap energi pendinginan (*trendline*). Berdasarkan grafik, peningkatan aspek rasio meningkatkan kebutuhan energi pendinginan pada semua luas jendela. Pada semua kasus, aspek rasio 1,75 membutuhkan energi pendinginan terkecil. Energi pendinginan merupakan energi yang harus diperlukan mesin AC untuk menghapus kelebihan panas. Semakin besar selisih panas yang diterima (*heat gain*) dengan yang dilepas bangunan (*heat loss*), semakin besar energi pendinginan yang diperlukan. Gambar 5.2 menunjukkan perolehan dan pelepasan panas (*heat gain* dan *heat loss*) model eksperimen saat moda aktif. Pada grafik terlihat peningkatan aspek rasio meningkatkan jumlah panas yang diterima (*heat gain*) sementara jumlah panas yang dilepas (*heat loss*) tidak mengalami perubahan berarti. Pengaruh penambahan luas selubung lebih signifikan pada luas jendela besar (J3, J4, J5). Semakin banyak panas yang diterima, semakin besar pula energi yang diperlukan untuk melepas kelebihan panas ke lingkungan (*sensible air cooling*).

Terdapat tiga faktor utama yang mempengaruhi beban panas yaitu selubung bangunan, beban panas internal, beban panas karena ventilasi dan infiltrasi (Juwana, 2005). Dalam studi ini, beban panas internal dan infiltrasi saat moda aktif

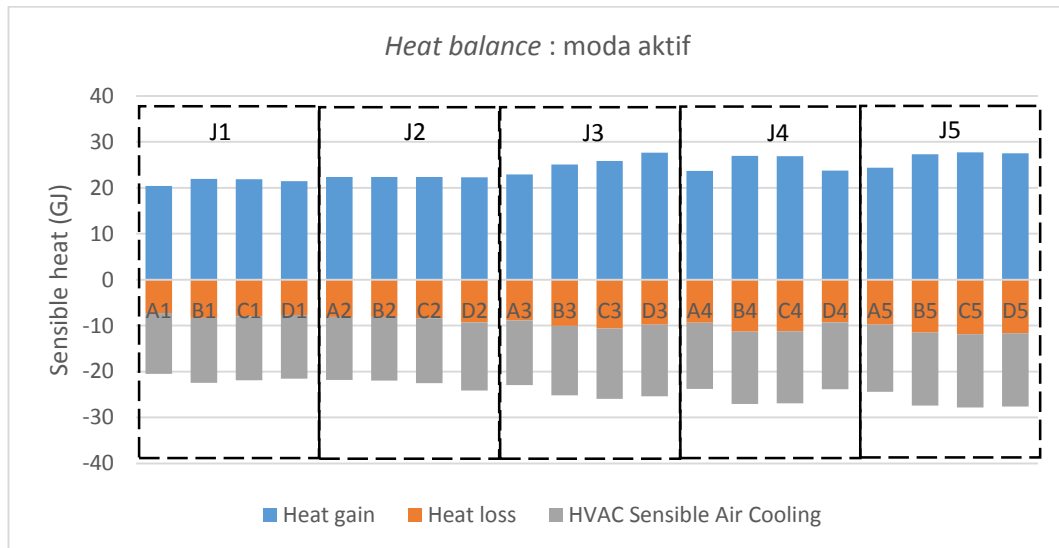
merupakan variabel kontrol sehingga pengaruh aspek rasio terhadap panas yang melalui selubung bangunan dapat dianalisis. Model eksperimen dengan aspek rasio berbeda dan luas jendela tetap (J1) dipilih sebagai perwakilan. Gambar 5.3 menunjukkan *elemental breakdown* model dengan luas jendela 1. Elemen penerima panas terbesar pada bangunan adalah atap dan langit-langit, sebesar 55 – 55,9% dari total panas yang diterima bangunan. Radiasi matahari yang diterima jendela menyumbang panas terbesar kedua (25 – 36%) diikuti dinding (9 – 14,1%). Sementara lantai dan kaca berperan melepas panas ke lingkungan. Grafik menunjukkan peningkatan aspek rasio meningkatkan jumlah panas yang diterima dinding. Sesuai rumus 2.2, perpindahan panas pada selubung bangunan secara konduksi dipengaruhi luas selubung (A), properti termal material (u -value) dan perbedaan temperatur udara ($T_o - T_i$). Pada studi ini, material merupakan variabel kontrol sehingga faktor yang berperan hanya luas selubung dan perbedaan temperatur udara. Oleh karena itu, pada bangunan beraspek rasio kecil, panas yang berpindah pada selubungnya juga kecil. Hasil studi ini sesuai dengan teori Markus dan Morris (1980) yang menyatakan panas yang berpindah pada bangunan yang kompak (s/v yang kecil) lebih sedikit.



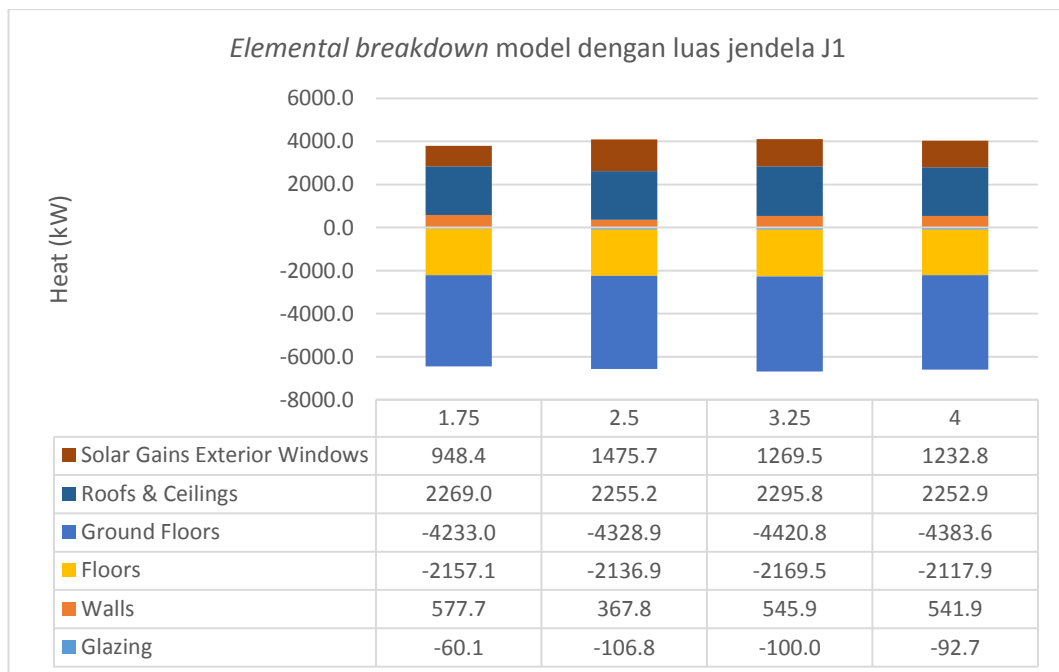
Gambar 5. 1 Hubungan aspek rasio dan energi pendinginan

Hasil eksperimen menunjukkan peningkatan energi pendinginan bervariasi antara 0,2 – 6,18% saat aspek rasio meningkat dari 1,75 menjadi 4 dengan interval 0,75. Nilai tersebut tidak signifikan karena seperti yang dibahas sebelumnya, dinding bukan penyumbang panas utama. Pada bangunan bertingkat rendah, atap dominan menerima panas, diikuti jendela (*solar heat gain*). Hasil ini memvalidasi

studi Inanici dan Demirbilek (2000). Peneliti menyatakan pengaruh perubahan aspek rasio terhadap energi pendinginan tidak signifikan di bangunan 3 lantai di iklim panas lembab (Antalya, Turki). Perbaikan yang terjadi hanya 3 – 6% saat aspek rasio meningkat dari 1 ke 2 dengan interval 0,2.

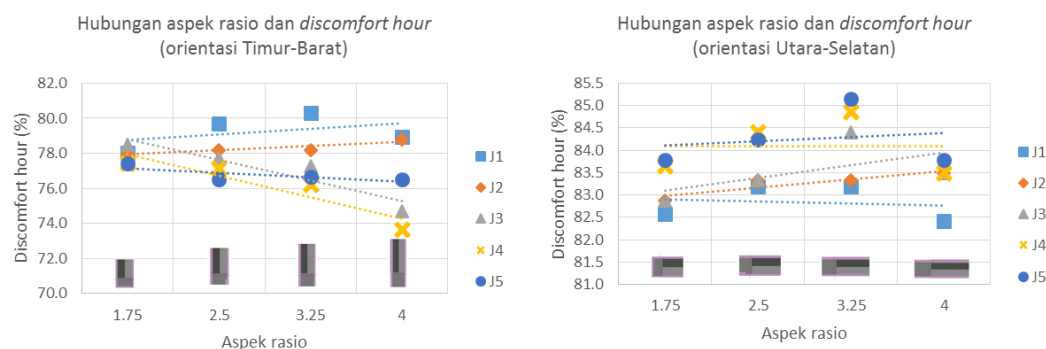


Gambar 5. 2 *Heat balance* model eksperimen saat moda aktif



Gambar 5. 3 *Elemental breakdown* model dengan luas jendela 1 (orientasi Timur-Barat)

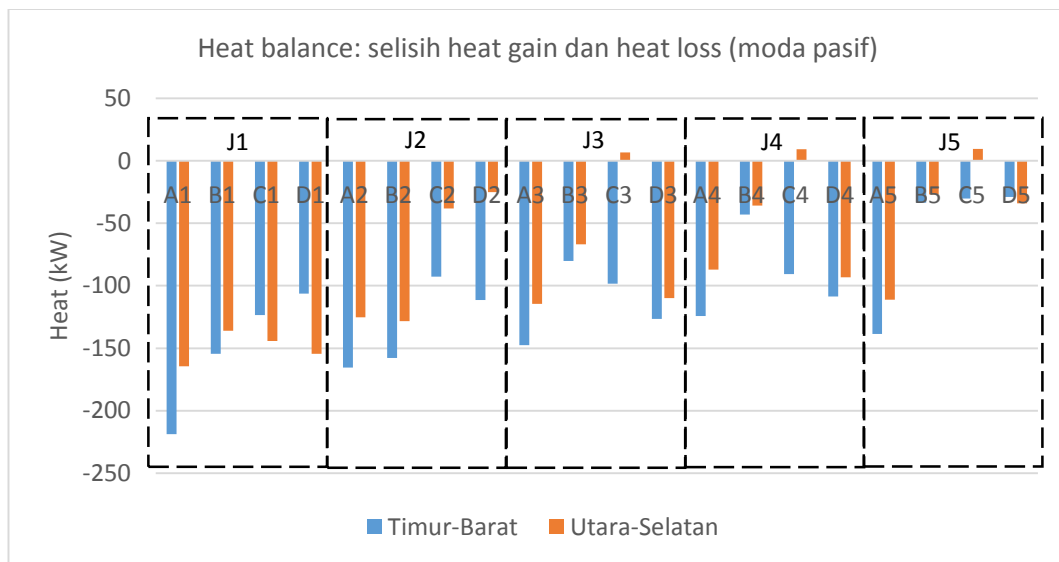
Pengaruh peningkatan aspek rasio terhadap *discomfort hour* saat moda pasif ditunjukkan gambar 5.4. Presentase waktu tidak nyaman meningkat seiring peningkatan aspek rasio pada model dengan luas jendela kecil (J1 dan J2) orientasi Timur-Barat. Pada model dengan luas jendela besar (J3, J4, J5), *discomfort hour* menurun saat aspek rasio meningkat. Sementara pada model dengan orientasi Utara-Selatan, peningkatan aspek rasio menunjukkan tren peningkatan waktu tidak nyaman. Kondisi tersebut diakibatkan panas yang diterima meningkat namun panas yang dilepas tidak mengalami perubahan signifikan atau bahkan menurun. Berbeda dengan moda aktif, saat moda pasif penghawaan berperan melepas panas. Gambar 5.5 menunjukkan selisih panas yang diterima dan dilepas saat moda pasif. Panas yang dilepas bangunan bertambah khususnya saat aspek rasio meningkat dari 2,5 ke 4 (B ke D) pada model orientasi Timur-Barat. Sebaliknya, panas yang dilepas bangunan berkurang saat aspek rasio meningkat dari 1,75 ke 3,25 (A ke C) untuk orientasi Utara-Selatan.



Gambar 5. 4 Hubungan aspek rasio dan *discomfort hour*

Salah satu indikator kinerja termal adalah temperatur udara. Gambar 5.6 menunjukkan rata-rata temperatur udara per jam pada model dengan luas jendela 4. Pada model dengan orientasi Timur-Barat, rata-rata temperatur udara tertinggi dimiliki model dengan aspek rasio 2,5 diikuti aspek rasio 3,25, dan 4. Rata-rata temperatur udara per jam menurun seiring peningkatan aspek rasio. Sebaliknya, pada orientasi Utara-Selatan, rata-rata temperatur udara tertinggi terlihat pada model dengan aspek rasio 3,25. Peningkatan aspek rasio meningkatkan rata-rata temperatur udara per jam. Zhang dkk (2017) melakukan studi pada sekolah 3 lantai

di iklim sub-tropis China saat musim panas. Peneliti menyatakan ruang yang dalam (lebih dari 8 m) meningkatkan ketidaknyaman termal saat musim panas meskipun memiliki kebutuhan energi yang rendah saat musim dingin. Peningkatan aspek rasio mengakibatkan kedalaman tiap ruang kelas berkurang. Model dengan aspek rasio 1,75 memiliki ruang kelas dengan kedalaman 13,08 m sementara ruang kelas pada model beraspek rasio 4 memiliki kedalaman 8,65 m. Hasil eksperimen ini memvalidasi studi Zhang dkk dimana model dengan aspek rasio 4 cenderung memiliki presentase waktu tidak nyaman yang lebih rendah. Hal ini disebabkan angin menyebar lebih merata.



Gambar 5. 5 Grafik keseimbangan panas (selisih *heat gain* dan *heat loss*)

Aspek rasio memiliki pengaruh yang tidak terlalu signifikan pada bangunan pendidikan berpenghawaan hibrida di iklim tropis. Secara umum, energi pendinginan dan *discomfort hour* meningkat seiring peningkatan aspek rasio. Hal ini diakibatkan selubung bangunan yang luas mengakomodasi perpindahan panas yang besar. Saat temperatur udara dalam ruang lebih tinggi dari luar, panas berpindah ke dalam ruang dan meningkatkan ketidaknyamanan serta kebutuhan energi pendinginan. Selain itu, peningkatan luas selubung berbanding lurus dengan total radiasi matahari yang diterima bangunan (Ling, Ahmad, dan Ossen, 2007). Presentase waktu tidak nyaman dapat menurun saat aspek rasio meningkat ketika

luas jendela besar (J3, J4, J5) dan menghadap arah datang angin (Timur-Barat). Namun, dibanding *discomfort hour*, pengaruh aspek rasio lebih signifikan terhadap energi pendingin.

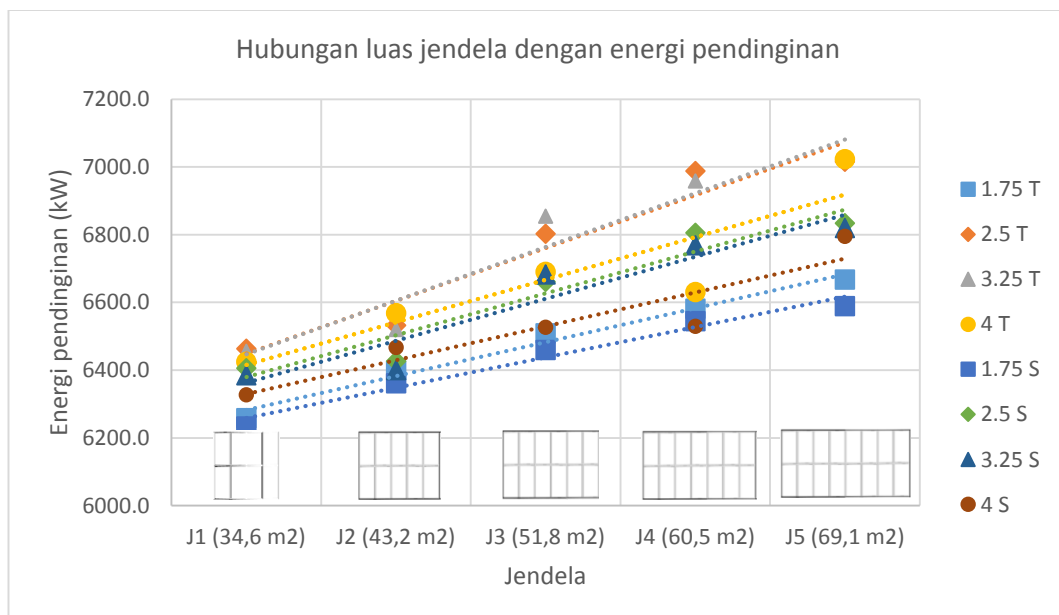


Gambar 5. 6 Temperatur udara tiap ruang pada model dengan luas jendela 4

5.2 Pengaruh luas jendela pada kinerja bangunan berpendinginaan hibrida

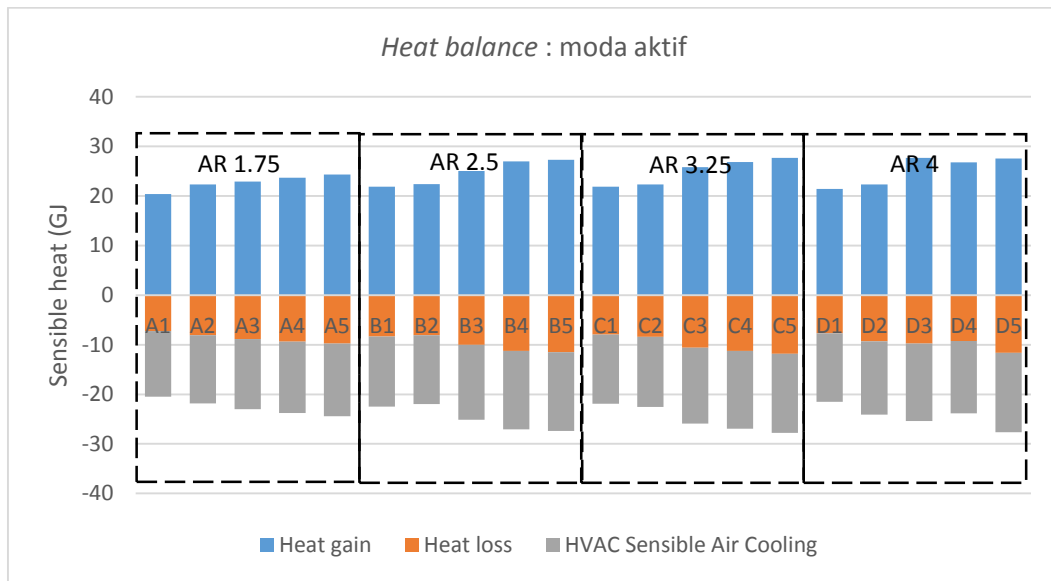
Pengaruh luas jendela terhadap kinerja termal bangunan berpendinginaan hibrida dianalisis saat moda pasif maupun aktif. Hubungan luas jendela dan energi pendinginan ditunjukkan gambar 5.7. Pada semua kasus, peningkatan luas jendela

berbanding lurus dengan peningkatan energi pendinginan. Penambahan luas jendela 100% (J1 ke J5) pada model dengan orientasi Timur-Barat meningkatkan energi pendinginan 6,5 – 9,3% saat bulan terdingin dan 8,1 – 11,2% saat bulan terpanas. Sementara peningkatan yang terjadi pada orientasi Utara-Selatan lebih kecil, yaitu 5,7 – 7,4% dan 6,4 - 7,4% masing-masing saat bulan terdingin dan terpanas. Hal ini dapat dijelaskan dengan melihat keseimbangan panas pada tiap model. Gambar 5.8 menunjukkan *heat balance* saat moda aktif dimana jumlah panas yang diterima (*heat gain*) bertambah seiring penambahan luas jendela. Akibatnya, beban pendinginan yang harus dilepas oleh mesin AC atau HVAC *sensible air cooling* juga meningkat.

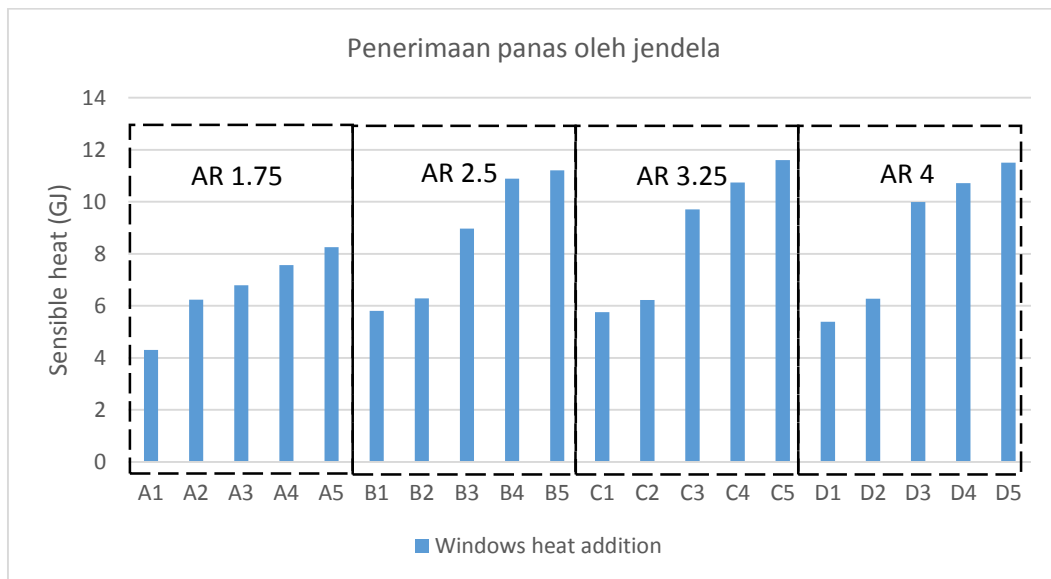


Gambar 5. 7 Hubungan luas jendela dengan energi pendinginan

Faktor yang berperan menambah panas saat moda aktif adalah selubung bangunan, panas internal, serta infiltrasi. Panas internal serta infiltrasi merupakan variabel kontrol sehingga pengaruh selubung bangunan dapat dianalisis. Secara umum, selubung bangunan terdiri atas permukaan *opaque* dan transparan (jendela). Gambar 5.9 menunjukkan jumlah panas sensibel yang diterima jendela pada tiap model eksperimen. Peningkatan luas jendela sebesar 100% (J1 ke J5) meningkatkan penambahan panas oleh jendela 3,95 – 6,12 GJ.



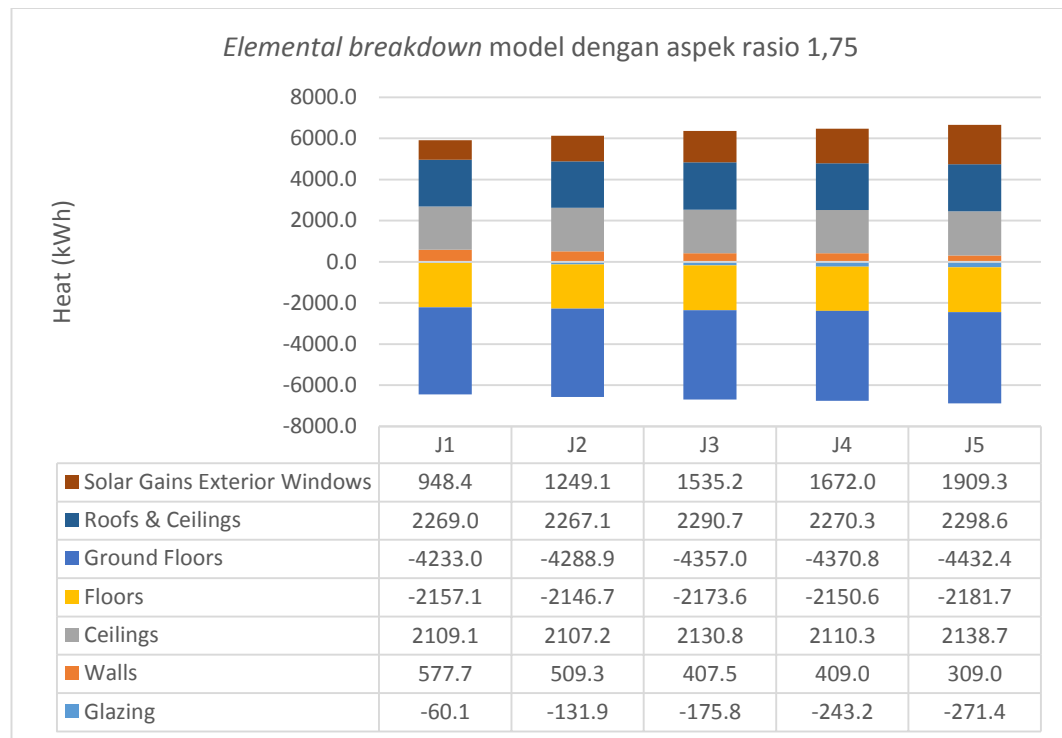
Gambar 5. 8 Keseimbangan panas tiap model saat moda aktif



Gambar 5. 9 Panas sensibel yang diterima jendela saat moda aktif

Analisis lebih lanjut dilakukan dengan model beraspek rasio 1,75 untuk mewakili karena semua kasus memiliki pola yang sama (Lampiran 9). Gambar 5.10 menunjukkan *elemental breakdown* model dengan lima luas jendela yang diuji sementara aspek rasio tetap (1,75). Grafik menunjukkan elemen penerima panas terbesar pada bangunan adalah atap dan langit-langit, sebesar 50,9 – 59,8%. Hal tersebut sesuai dengan studi oleh Ciampi, Leccese, dan Tuoni (2005) yang

menyatakan lebih dari 50% penerimaan panas bangunan disumbang oleh atap. Radiasi matahari melalui jendela menyumbang panas terbesar kedua (25 – 42,3%), diikuti panas yang diterima dinding (6,8 – 15,2%). Sementara lantai dan kaca (*glazing*) menjadi elemen yang melepas panas ke lingkungan. *Elemental breakdown* tersebut menunjukkan terdapat dua jenis perpindahan panas pada jendela, yaitu *glazing* dan radiasi matahari melalui jendela (*solar gain exterior window*). Dalam *DesignBuilder user manual* (2009), perpindahan panas melalui kaca (*glazing*) adalah total panas yang berpindah melalui kaca dan kusen, baik secara konveksi, radiasi gelombang panjang, dan konduksi. Sementara radiasi matahari (*solar gain exterior window*) adalah transmisi radiasi gelombang pendek matahari yang masuk melalui jendela.



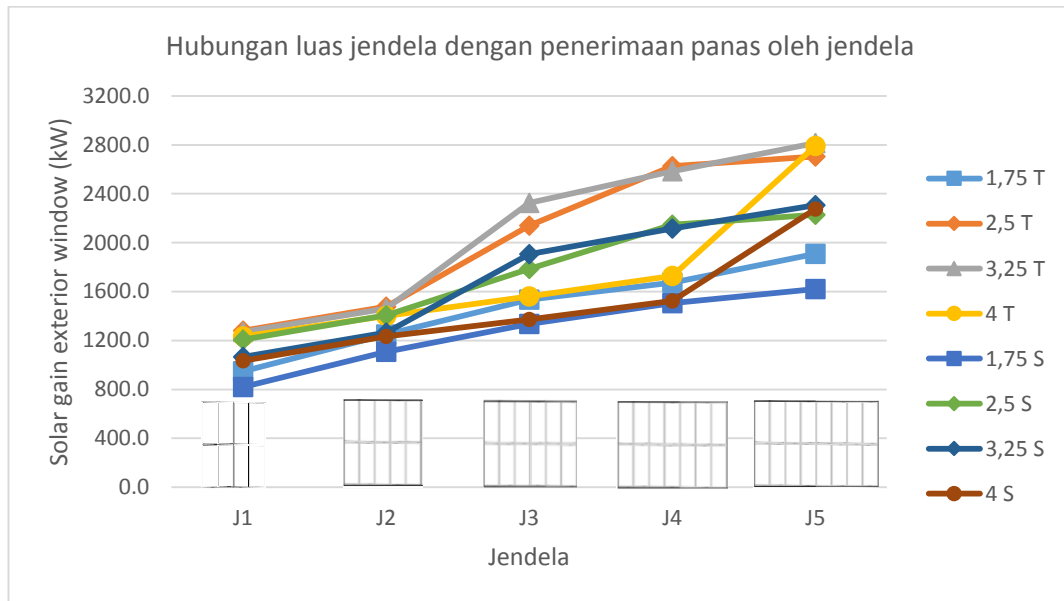
Gambar 5. 10 Perpindahan panas pada tiap elemen bangunan model dengan aspek rasio 1,75

Aliran panas melalui jendela dibagi menjadi dua, yaitu akibat perbedaan temperatur dalam dan luar ruang serta radiasi matahari yang diterima (Markus dan Morris, 1980). Perpindahan panas karena perbedaan temperatur dipengaruhi luas permukaan (A), koefisien perpindahan panas (k), serta perbedaan temperatur dalam

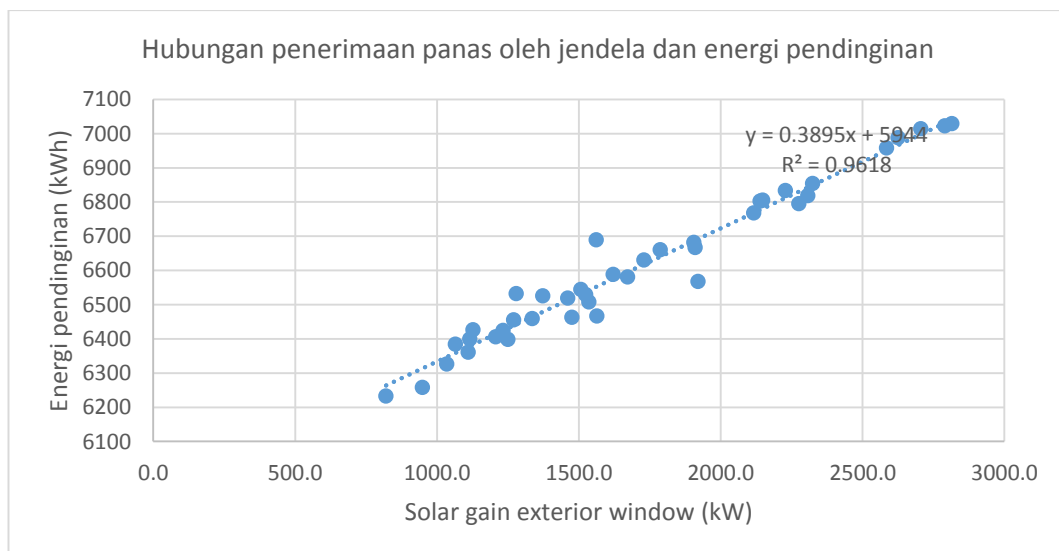
(T_i) dan luar ruang (T_o). Dalam studi ini, material menjadi variabel kontrol sehingga yang mempengaruhi perpindahan panas adalah luas permukaan dan selisih temperatur. Semakin luas permukaan jendela, semakin besar jumlah panas yang berpindah. Grafik *elemental breakdown* menunjukkan nilai perpindahan panas karena selisih temperatur bernilai negatif, dimana T_o lebih kecil dari T_i sehingga yang terjadi adalah pelepasan panas (*heat loss*). Semakin luas jendela, semakin besar panas yang dilepas melalui jendela. Namun, perpindahan panas karena perbedaan temperatur jauh lebih kecil dari penerimaan panas radiasi matahari (Lu, Li, & Zhao, 2015). Panas yang dilepas jendela berkisar 60,1 – 271,4 kWh sementara panas yang diterima dari radiasi matahari sebesar 948,4 – 1909,3 kWh. Radiasi matahari yang diterima melalui jendela merupakan aspek penting yang mempengaruhi kinerja termal dan energi bangunan.

Gambar 5.11 menunjukkan hubungan luas jendela dengan penerimaan radiasi panas melalui jendela. Peningkatan luas jendela sebesar 100% (J1 ke J5) meningkatkan radiasi panas yang diterima bangunan 84,6 – 126,3%. Jendela yang menghadap ke arah Timur-Barat menerima radiasi yang lebih tinggi dibandingkan Utara-Selatan. Peningkatan penerimaan radiasi panas matahari melalui jendela memiliki hubungan kuat dengan peningkatan energi pendinginan ($R^2 = 0,96$) seperti yang ditunjukkan gambar 5.12. Peningkatan energi pendinginan seiring peningkatan luas jendela pada eksperimen ini memvalidasi studi yang dilakukan Inanici dan Demirebilek (2000) serta *Organization of American States* (2013). Inanici dan Demirebilek melaporkan peningkatan luas jendela yang menghadap selatan (*south window size*) pada bangunan tiga lantai meningkatkan beban pendinginan pada konteks iklim panas dan lembab (Antalya, Turki). Hasil yang sama diungkapkan *Organization of American States*. Dalam studi dengan konteks iklim tropis lembab tersebut, perubahan WWR dari 20% menjadi 80% meningkatkan energi pendinginan sebesar 34%. Peningkatan energi pendinginan dalam studi tersebut lebih signifikan karena jumlah jendela yang lebih luas (WWR 80%) dan konteks bangunan 8 lantai. Eksperimen ini menunjukkan peningkatan energi pendinginan seiring peningkatan luas jendela pada bangunan bertingkat rendah dan berpeneduh (*horizontal lovers*) tidak signifikan pada bangunan bertingkat menengah dan tinggi. Hal tersebut dikarenakan elemen bangunan

penyumbang panas tertinggi adalah atap, bukan dinding atau jendela. Dinding dan jendela masih terbayangi oleh atap. Sementara pada bangunan bertingkat tinggi, fasad adalah elemen utama yang menerima radiasi matahari dan mengakibatkan ketidaknyamanan termal serta tingginya konsumsi energi pendinginan (Lau dkk, 2016).

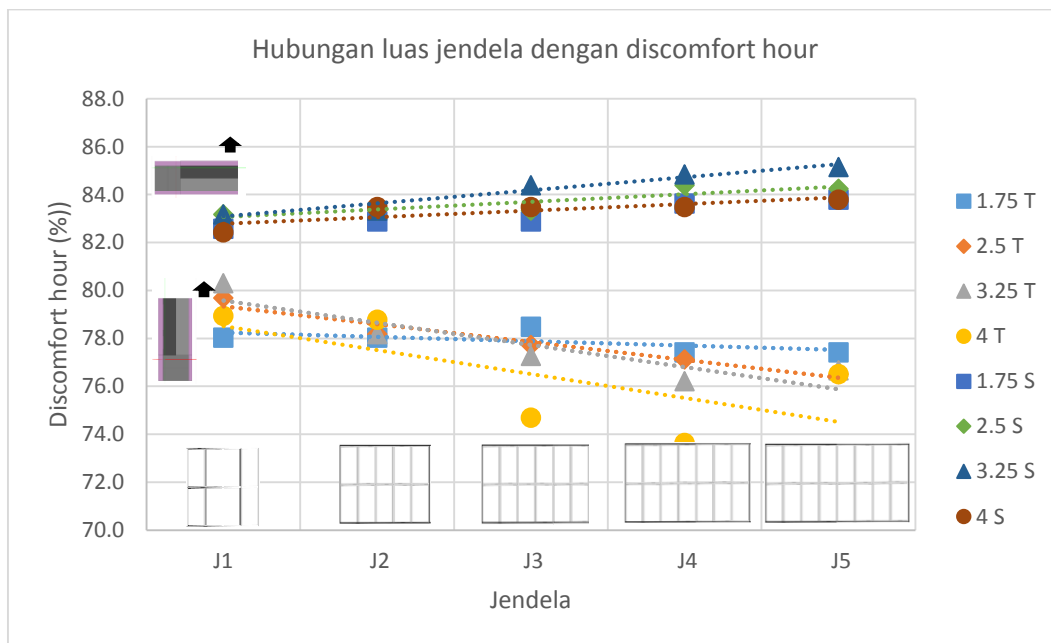


Gambar 5. 11 Hubungan luas jendela dengan penerimaan panas oleh jendela



Gambar 5. 12 Hubungan penerimaan panas oleh jendela dan energi pendinginan

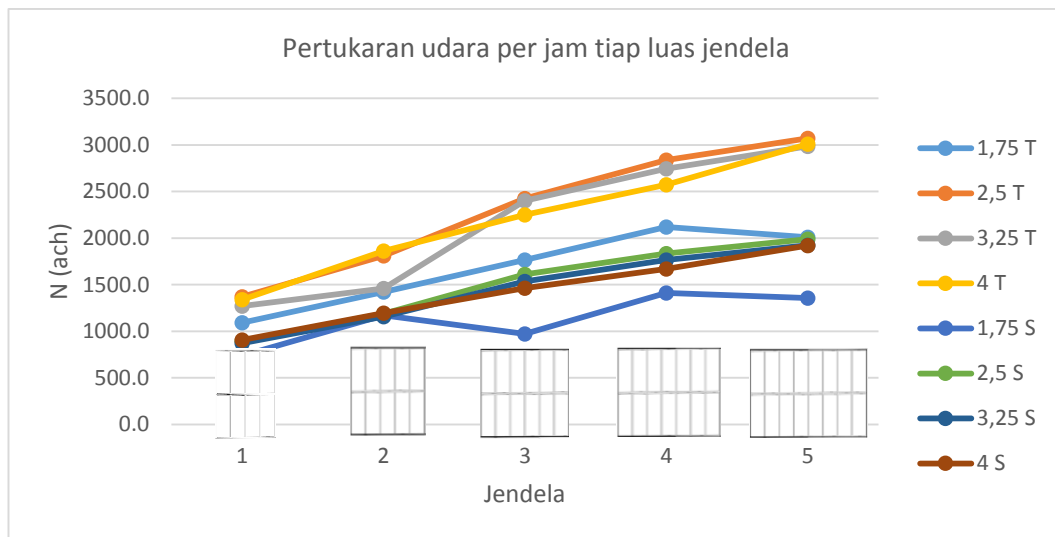
Hubungan luas jendela dan *discomfort hour* ditunjukkan gambar 5.13. Pada model dengan orientasi Timur-Barat, peningkatan luas jendela sebesar 100% (J1 ke J5) menurunkan *discomfort hour* 0,78 – 4,53%. Sementara pada model dengan orientasi Utara-Selatan, peningkatan luas jendela sebesar 100% (J1 ke J5) meningkatkan *discomfort hour* 1,28 – 2,37%. Seperti yang telah dibahas sebelumnya, peningkatan luas jendela meningkatkan panas yang diterima bangunan. Namun, saat penghawaan alami digunakan, jendela berperan mengalirkan udara untuk menghapus panas. Variabel yang mempengaruhi perpindahan panas melalui penghawaan (konveksi) adalah volume ruang (*vol*), jumlah pertukaran udara per jam (*N*), dan perbedaan temperatur ($T_o - T_i$) seperti yang ditunjukkan rumus 2.3. Jumlah pertukaran udara per jam bergantung pada kecepatan angin (*v*) dan luas bukaan (*A*) (rumus 2.4).



Gambar 5. 13 Hubungan luas jendela dengan *discomfort hour*

Semakin luas bukaan, semakin besar jumlah pertukaran udara per jam dan semakin tinggi laju perpindahan panas. Peningkatan luas jendela berbanding lurus dengan peningkatan pertukaran udara per jam seperti yang ditunjukkan gambar 5.14. Peningkatan jumlah pertukaran udara per jam meningkatkan pelepasan panas

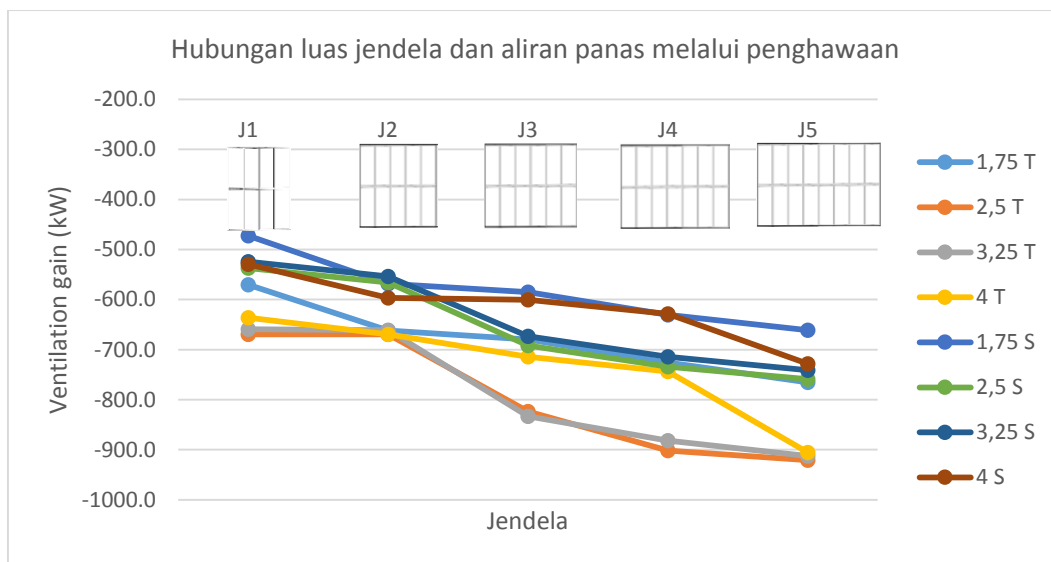
melalui penghawaan/ventilasi seperti yang ditunjukkan gambar 5.15. Grafik menunjukkan jumlah panas yang dilepas melalui penghawaan pada model dengan orientasi Timur-Barat lebih tinggi dibandingkan Utara-Selatan karena Timur-Barat merupakan arah angin dengan frekuensi tersering di Surabaya. Peningkatan luas jendela sebesar 100% (J1 ke J5) meningkatkan pelepasan panas melalui penghawaan sebesar 34,09 – 42,35%. Hasil ini mem-validasi studi Fallahtafti dan Mahdavinejad (2015) yang menyatakan semakin luas jendela, semakin banyak panas yang dipindahkan ke luar bangunan (*heat loss*) melalui ventilasi. Selain itu, Sacht dan Lukiantchuki (2017) melaporkan peningkatan luas *inlet* menghasilkan ΔC_p atau selisih koefisien tekanan yang lebih tinggi. Nilai ΔC_p yang tinggi mengindikasikan besarnya pergerakan udara pada ruang.



Gambar 5. 14 Pertukaran udara per jam tiap luas jendela

Seperti pembahasan sebelumnya, peningkatan luas jendela meningkatkan penerimaan radiasi matahari sekaligus meningkatkan jumlah panas yang dilepas melalui penghawaan. Gambar 5.16 menunjukkan selisih panas yang diterima dan dilepas tiap model. Pada orientasi Timur-Barat, grafik bergeser ke skala negatif saat luas jendela bertambah yang menunjukkan semakin banyak panas yang dilepas. Hal ini menunjukkan panas yang dilepas melalui penghawaan dapat mengkompensasi panas yang diterima karena peningkatan luas jendela. Sebaliknya, bertambahnya luas jendela mengakibatkan grafik bergerak ke skala positif atau semakin banyak

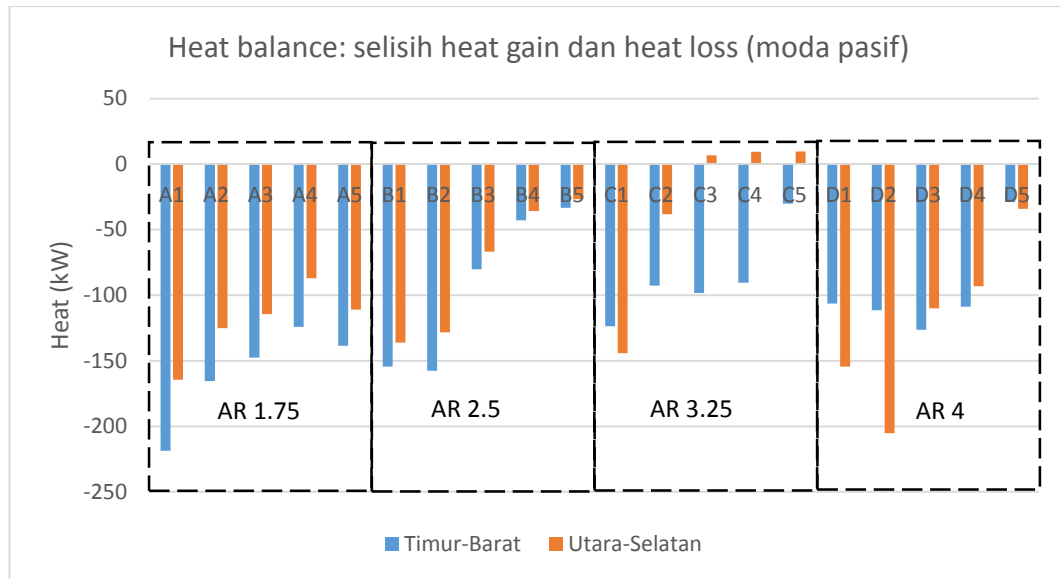
panas yang diterima pada orientasi Utara-Selatan. Hal ini sejalan dengan studi oleh Liping dan Hien (2007) di Singapura. Peneliti menyatakan peningkatan WWR dari 0,12 menjadi 0,24 akan memperbaiki kondisi termal dalam ruang dimana presentase kenyamanan termal meningkat 13%. Namun peningkatan WWR melebihi 0,3 tidak menunjukkan perbaikan signifikan terhadap kondisi termal bila tidak menggunakan peneduh. Pada eksperimen ini, peningkatan luas jendela pada model dengan aspek rasio yang sama meningkatkan WWR. Namun, sesuai studi Liping dan Hien (2007), peningkatan WWR tidak selalu dapat mengkompensasi peningkatan temperatur udara karena penambahan panas yang diterima (*heat gain*) seperti pada orientasi Utara-Selatan.



Gambar 5. 15 Hubungan luas jendela dan aliran panas melalui penghawaan

Peningkatan luas jendela akan meningkatkan energi pendinginan karena radiasi panas matahari yang diterima juga meningkat. Saat moda pasif, peningkatan luas jendela berbanding lurus dengan peningkatan jumlah pertukaran udara per jam dan pelepasan panas melalui penghawaan (Fallahtafti dan Mahdavinejad, 2015). Namun peningkatan luas jendela tidak selalu dapat mengkompensasi peningkatan temperatur udara karena penambahan panas yang diterima (Liping dan Hien, 2007). Berdasarkan hasil eksperimen, pengaruh luas jendela terhadap energi pendinginan lebih signifikan dibandingkan *discomfort hour*. Hasil ini sejalan dengan studi

Tenorio (2002) dimana peningkatan luas jendela meningkatkan energi pendinginan sekaligus *degree hour* (akumulasi selisih kondisi tidak nyaman terhadap rentang nyaman). Tenorio menyatakan pengaruh peningkatan luas jendela lebih signifikan terhadap energi pendinginan dibandingkan kenyamanan termal saat penghawaan alami (*free running*).

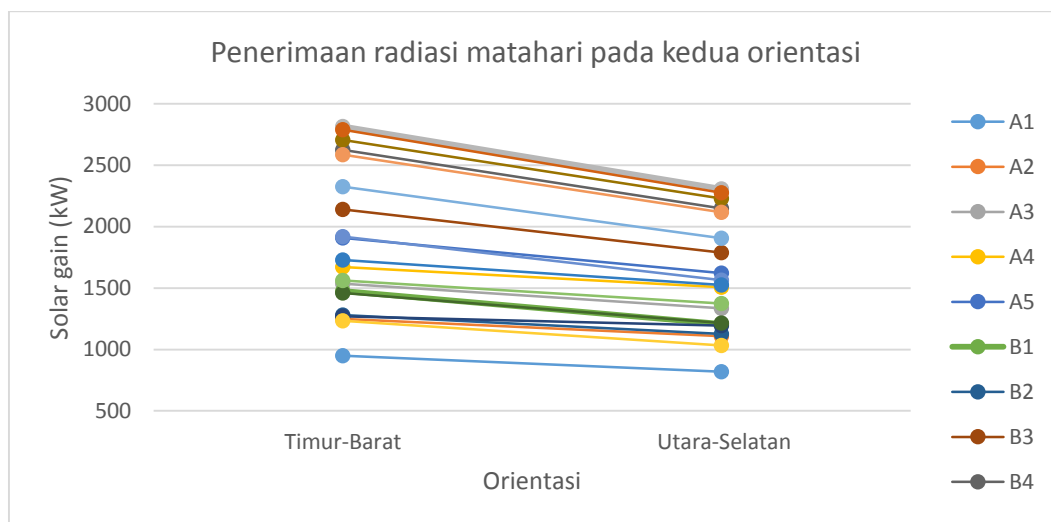


Gambar 5. 16 Grafik keseimbangan panas (selisih *heat gain* dan *heat loss*)

5.3 Pengaruh orientasi pada kinerja bangunan berpenghawaan hibrida

Pengaruh orientasi terlihat ketika model dengan aspek rasio atau luas jendela yang sama memiliki perilaku termal yang berbeda saat orientasi berbeda. Energi pendinginan yang dibutuhkan model dengan orientasi Timur-Barat selalu lebih tinggi dari orientasi Utara-Selatan 0,4 - 7,24%. Perbedaan orientasi mengakibatkan perbedaan jumlah dan durasi radiasi matahari yang diterima bangunan sehingga berdampak pada kinerja termal dan energi (Emuwa, 2016). Pengaruh radiasi matahari yang diterima (*solar heat gain*) terhadap kinerja termal bangunan lebih besar dibandingkan transmisi panas akibat perbedaan temperatur udara (Lu, Li, dan Zhao, 2015). Hasil eksperimen menunjukkan model dengan orientasi Timur-Barat menerima radiasi matahari yang lebih tinggi 6,37 – 22,78% dari Utara-Selatan seperti yang ditunjukkan gambar 5.17. Semakin kompak bangunan, semakin landai perbedaan radiasi matahari yang diterima kedua

orientasi. Sebaliknya, semakin panjang bangunan (aspek rasio tinggi), semakin besar perbedaan radiasi yang diterima. Hal ini menunjukkan orientasi berperan penting pada bangunan memanjang (Ling, Ahmad, dan Ossen, 2007).



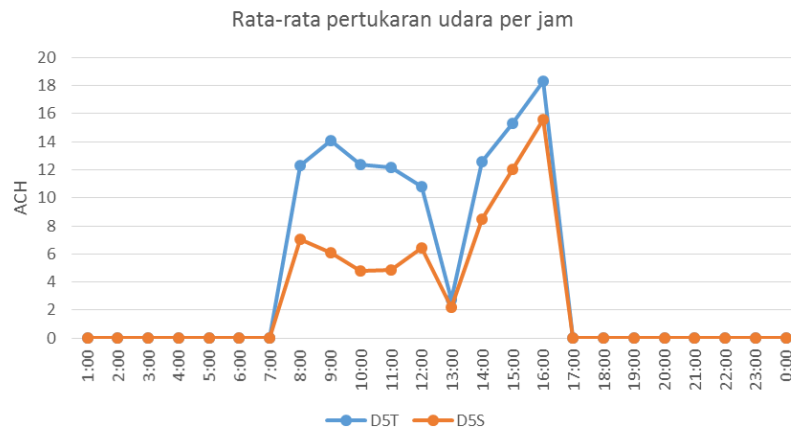
Gambar 5. 17 Penerimaan radiasi matahari pada kedua orientasi

Radiasi matahari yang diterima bangunan terdiri atas radiasi langsung (*direct*), terdifusi (*diffuse*), dan pantulan (*reflected*). Radiasi langsung memiliki pola yang sama dengan waktu penyinaran matahari. Lu, Li, dan Zhao (2015) melaporkan pada jendela yang menghadap Timur atau Barat, radiasi langsung berperan penting terhadap penerimaan panas. Radiasi langsung mengakibatkan peningkatan temperatur dalam ruang. Sementara pada jendela yang menghadap Utara atau Selatan, *diffuse radiation* dan *reflected radiation* adalah sumber utama penerimaan panas. Hal yang sama dinyatakan Emuwa (2016), pada ruang dengan kaca yang tidak terpapar matahari secara langsung, peran temperatur permukaan akibat *diffuse radiation* oleh radiasi gelombang panjang lebih besar. *Diffuse radiation* mengakibatkan peningkatan temperatur permukaan. Namun, pada ruang dengan *clear glass* (transmisi yang tinggi), radiasi matahari lebih berpengaruh terhadap ketidaknyamanan termal dibandingkan temperatur permukaan (Khamporn dan Chaiyapinunt, 2014).

Dua model dengan aspek rasio dan luas jendela yang sama, D5T dan D5S, dianalisis untuk melihat pengaruh orientasi terhadap kinerja bangunan. Gambar

5.18 menunjukkan rata-rata kinerja bangunan per jam pada bulan terdingin (Januari). Rata-rata temperatur udara D5T lebih tinggi 0,05 – 0,3°C dari D5S. MRT D5T juga lebih tinggi 0,23 – 0,35°C dari D5S. Hal tersebut disebabkan total radiasi yang diterima D5T (radiasi langsung, *diffuse*, dan *reflected* radiation) lebih tinggi dari D5S. Kondisi tersebut terjadi pagi hari saat matahari terbit pukul 05.00 hingga 10.00 dan saat matahari terbenam pukul 16.00 – 18.00. Perbedaan radiasi yang diterima antara kedua orientasi per jam mencapai 4,7 kWh.

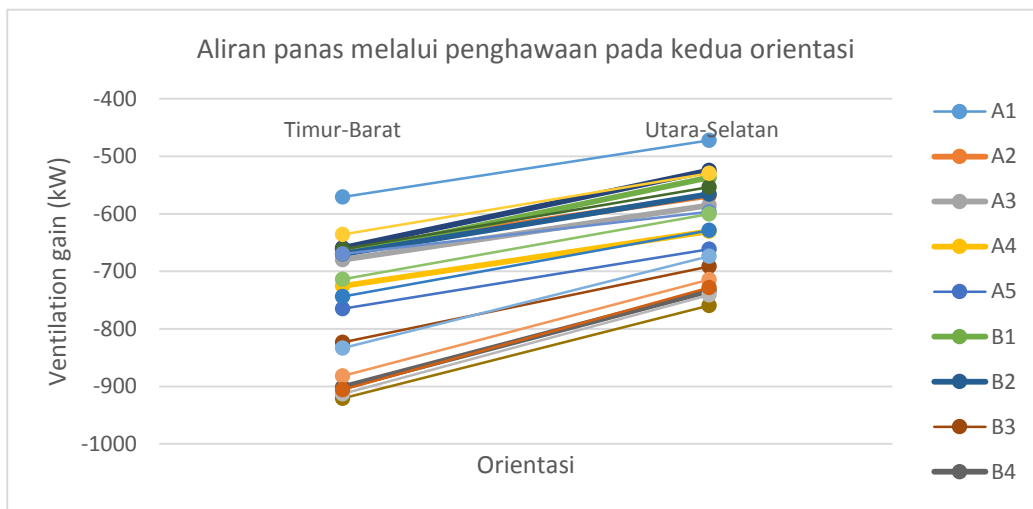




Gambar 5. 18 Rata-rata kinerja termal per jam model D5T dan D5S

Meskipun bangunan berorientasi Timur-Barat menerima radiasi matahari yang lebih tinggi, kinerja termal bangunan saat memanfaatkan penghawaan alami lebih baik. Hasil eksperimen menunjukkan model dengan orientasi Utara-Selatan memiliki *discomfort hour* yang lebih tinggi 3,6 – 13,4% dari Timur-Barat. Pelepasan panas melalui penghawaan bangunan berorientasi Timur-Barat lebih tinggi 12,29 -25,76% dari Utara-Selatan seperti yang ditunjukkan gambar 5.19. Pengaruh orientasi terhadap penghawaan dapat dilihat pada gambar 5.18. Model D5T melepas lebih banyak panas melalui penghawaan dibandingkan D5S. Selisih panas yang dilepaskan mencapai 1,5 kWh. Penyebabnya, lebih banyak pertukaran udara per jam yang terjadi di model D5T. Selisih keduanya mencapai 7,99 ACH. Pada konteks Surabaya, arah angin dengan frekuensi tersering adalah Timur-Barat. Menghadapkan jendela ke arah datang angin dapat meningkatkan efektivitas penghawaan (Lechner, 2001; Aldawoud, 2016).

Hasil eksperimen ini sejalan dengan teori Szokolay (2004) yang menyatakan sisi Timur dan Barat bangunan menerima radiasi panas yang tinggi. Namun, karena Timur dan Barat merupakan arah datang angin dengan frekuensi tersering di Surabaya, potensi pelepasan panas melalui penghawaan juga tinggi. Orientasi memiliki pengaruh yang bertolak belakang terhadap energi pendinginan dan *discomfort hour*. Namun, pengaruh terhadap *discomfort hour* lebih signifikan sehingga orientasi yang lebih sesuai untuk menerapkan sistem penghawaan hibrida adalah Timur-Barat.



Gambar 5. 19 Aliran panas melalui penghawaan pada kedua orientasi

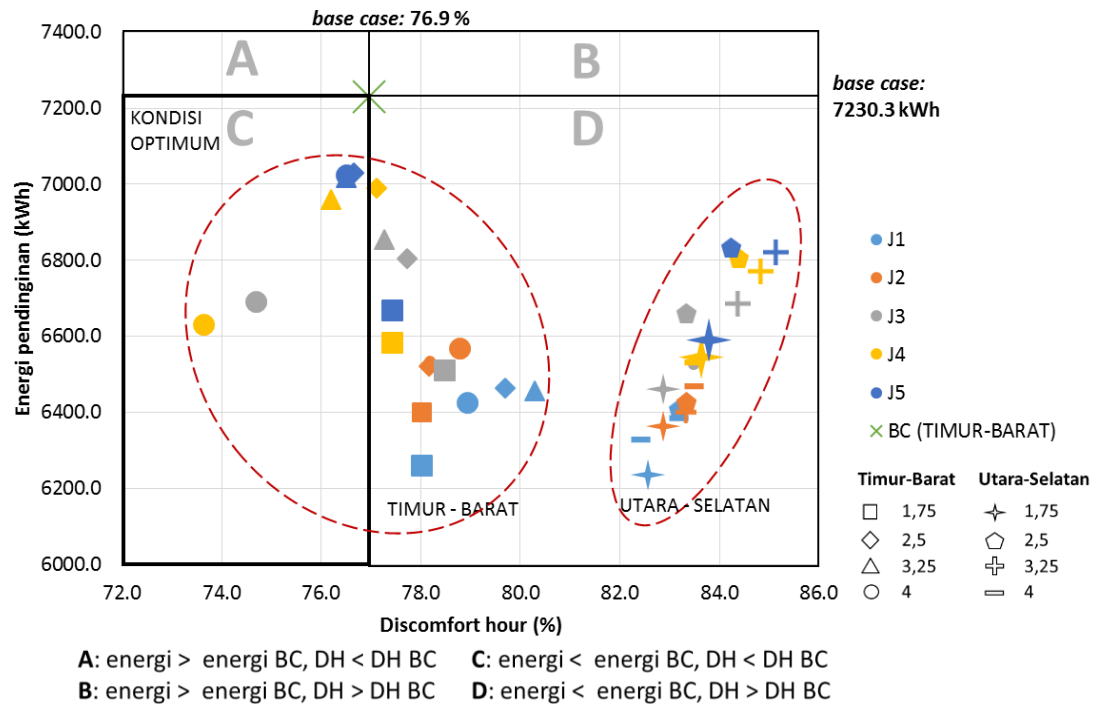
5.4 Optimasi

Hasil eksperimen dipetakan pada kuadran evaluasi untuk menemukan konfigurasi selubung bangunan pendidikan dengan kinerja termal dan energi yang baik bila menerapkan penghawaan hibrida. Pada bagian pertama, parameter yang digunakan adalah kinerja termal dan energi *base case*. Hasil optimasi ini menunjukkan model eksperimen dengan kinerja teroptimum dibandingkan *base case*. Pada bagian kedua, indikator yang digunakan adalah IKE (Intensitas Konsumsi Energi) dan *discomfort hour* (parameter SNI).

5.4.1 Parameter *base case*

Hasil eksperimen dipetakan pada kuadran evaluasi untuk menemukan konfigurasi selubung bangunan pendidikan dengan kinerja termal dan energi yang lebih baik dibandingkan *base case* bila menerapkan penghawaan hibrida. Posisi model dalam kuadran evaluasi menunjukkan presentase *discomfort hour* ketika moda pasif digunakan penuh selama sebulan dan energi pendinginan saat moda aktif digunakan penuh selama sebulan. Parameter yang digunakan adalah kinerja *base case*, dengan kebutuhan energi pendinginan 7230,3 kWh saat moda aktif dan *discomfort hour* 76,9% saat moda pasif. Kinerja bangunan yang digunakan pada tahap optimasi adalah saat kondisi bulan terdingin karena pada bulan terpanas kinerja termal tiap model tidak memiliki perubahan berarti.

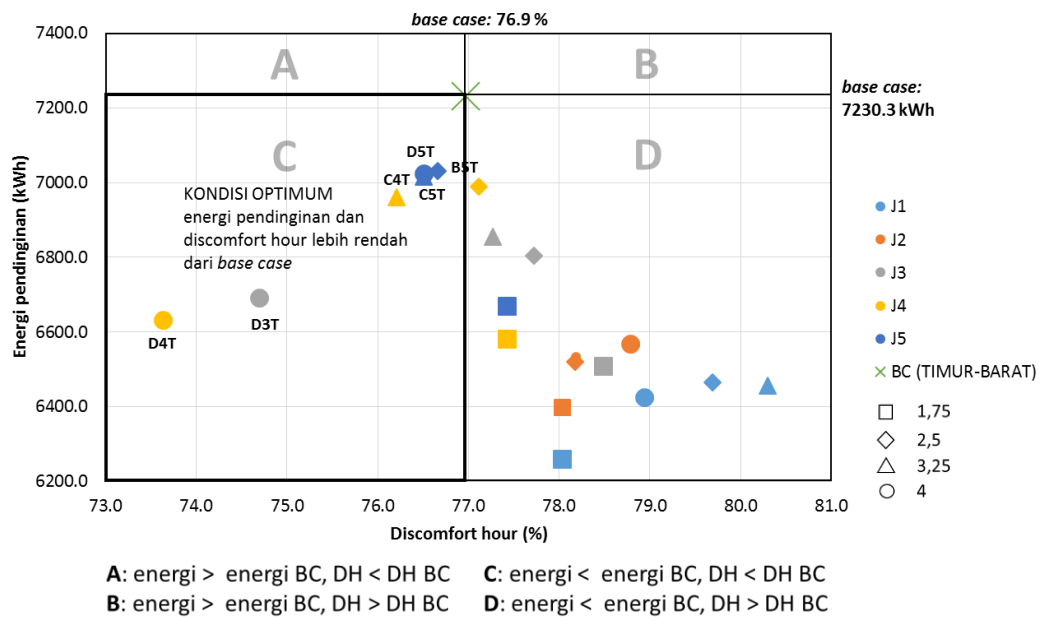
Gambar 5.20 menunjukkan posisi tiap model eksperimen pada kuadran evaluasi. Tidak ada model yang berada di posisi A (energi pendinginan tinggi, *discomfort hour* rendah) dan B (energi pendinginan tinggi, *discomfort hour* tinggi). Grafik menunjukkan model dengan orientasi berbeda terbagi dalam dua kelompok. Seluruh model dengan orientasi Utara-Selatan berada di posisi D di kuadran evaluasi yang menunjukkan kebutuhan energi pendinginan yang rendah dan *discomfort hour* tinggi. Sementara model dengan orientasi Timur-Barat terbagi di posisi C dan D. Enam model berada di kuadran C (kondisi optimum) dimana kebutuhan energi pendinginan saat moda aktif dan *discomfort hour* saat moda pasif lebih rendah dibanding *base case*. Analisis lebih lanjut dilakukan per orientasi.



Gambar 5. 20 Kuadran optimasi dengan parameter *base case*

Posisi model dengan orientasi Timur-Barat pada kuadran terbagi di C dan D seperti yang ditunjukkan gambar 5.21. Enam model memiliki kinerja lebih baik dari *base case* sementara sisanya memiliki kebutuhan energi pendinginan yang lebih rendah dari *base case* namun *discomfort hour* yang lebih tinggi saat moda pasif. Model dengan luas jendela rendah (J1 dan J2) memiliki energi pendinginan

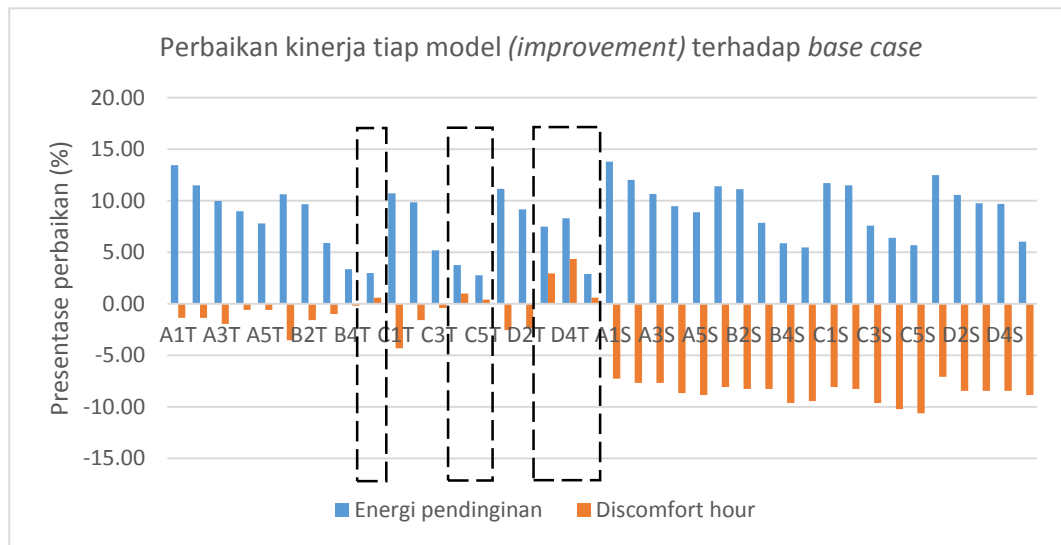
yang rendah dan *discomfort hour* yang tinggi. Semakin luas jendela, posisi model pada kuadran semakin bergeser ke kiri dan ke atas yang berarti *discomfort hour* berkurang namun energi pendinginan meningkat. Model dengan luas jendela rendah tidak dapat masuk ke kuadran C (optimum). Pada model dengan luas jendela besar (J3, J4, J5), semakin kecil aspek rasio posisi pada kuadran bergeser ke kanan bawah atau kebutuhan energi pendinginan yang rendah namun *discomfort hour* tinggi. Model dengan jendela yang luas dan aspek rasio kecil tidak masuk ke kuadran C (optimum). Enam model eksperimen yang berada di kuadran C adalah D4T, D3T, C4T, B5T, C5T, dan D5T. Model-model tersebut memiliki persamaan yaitu jendela yang luas dan aspek rasio yang tinggi. Dari keenamnya, D4T mampu menurunkan energi pendinginan sebesar 9,3% dan *discomfort hour* 4,3%. Perbaikan kinerja tiap model terhadap *base case* (Timur-Barat) ditunjukkan pada gambar 5.22.



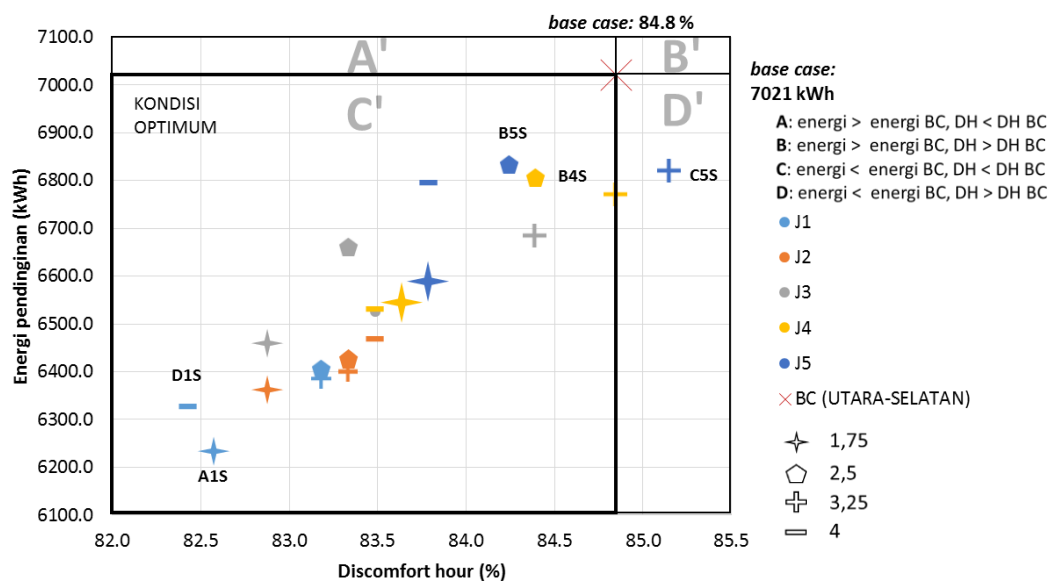
Gambar 5. 21 Model dengan orientasi Timur-Barat pada kuadran optimasi

Berdasarkan pembahasan awal, semua model dengan orientasi utara selatan membutuhkan energi pendinginan yang rendah namun presentase waktu tidak nyaman yang lebih tinggi dibanding *base case* (kuadran D). Untuk menganalisis model dengan orientasi Utara-Selatan, ditambahkan *base case* dengan orientasi

Utara-Selatan sebagai parameter yang ditunjukkan gambar 5.23. Dengan parameter tersebut, semua model kecuali C5S berada di kuadran C' (kondisi optimum). Grafik menunjukkan semakin luas jendela, posisi model pada kuadran bergeser ke kanan dan ke atas yang berarti energi pendinginan dan *discomfort hour* meningkat. Pada orientasi Utara-Selatan, kinerja bangunan saat moda aktif dan pasif berjalan beriringan (tidak bertolak belakang). Model dengan aspek rasio kecil berada di kiri bawah kuadran yang menunjukkan kebutuhan energi rendah dan *discomfort hour* rendah.



Gambar 5. 22 Perbaikan kinerja tiap model terhadap *base case* (Timur-Barat)



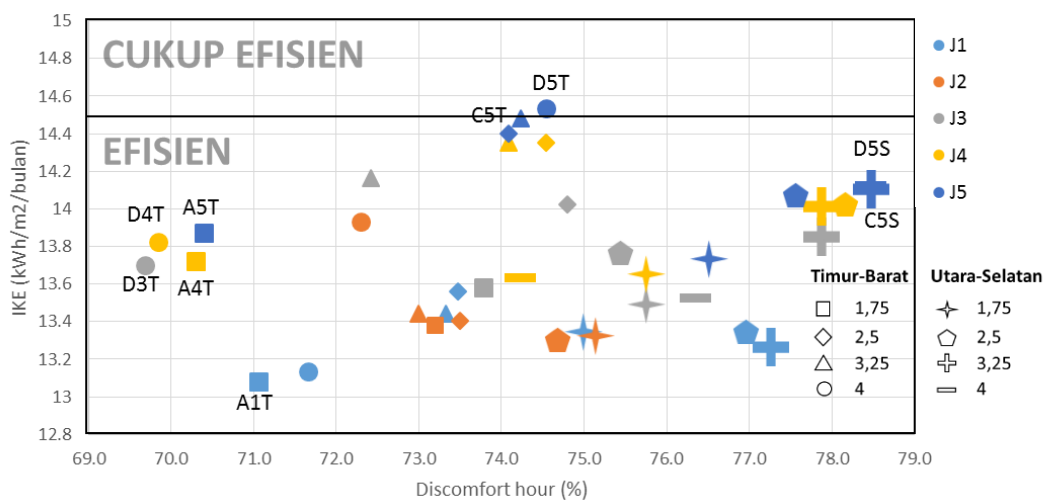
Gambar 5. 23 Model dengan orientasi Utara-Selatan pada kuadran optimasi dengan parameter *base case* (Utara-Selatan)

5.4.2 Parameter standar IKE dan SNI

Pada bagian kedua, hasil eksperimen dipetakan pada kuadran evaluasi dengan indikator energi IKE (Intensitas Konsumsi Energi) dan klasifikasi nilai IKE berdasarkan Permen ESDM No. 13/2012 sebagai parameter. IKE menunjukkan besar energi yang digunakan suatu bangunan gedung perluas area yang dikondisikan dalam satu bulan atau satu tahun. Sementara parameter kinerja termal adalah zona nyaman yang direkomendasikan SNI 6390 – 2011. Indikatornya presentase waktu tidak nyaman (jumlah jam nyaman saat waktu operasional dibandingkan total jam operasional). Kondisi optimum pada kuadran evaluasi berada di kiri bawah, IKE semakin efisien dan *discomfort hour* rendah.

Nilai IKE tiap model bervariasi antara 13,08 – 14,53 kWh/m²/bulan atau 156,96 – 174,36 kWh/m²/tahun. Nilai tersebut memenuhi standar IKE yang direkomendasikan Peraturan Gubernur No. 38 tahun 2012 yaitu 195 – 265 kWh/m²/tahun. Nilai IKE dalam studi ini cenderung rendah karena *input* simulasi penggunaan peralatan elektronik lainnya minimal. Sementara pada kenyataan, penggunaan alat elektronik di bangunan pendidikan sangat besar. Posisi tiap model terhadap skala IKE sama dengan posisinya terhadap energi pendinginan. Sementara *discomfort hour* bervariasi antara 69,7 – 78,5%. Presentase waktu tidak nyaman berdasarkan parameter SNI lebih rendah dibandingkan parameter ASHRAE. Hal ini disebabkan rentang nyaman SNI menggunakan indikator temperatur udara sementara ASHRAE menggunakan temperatur operatif (kombinasi temperatur udara dan MRT). Namun, meskipun parameter kenyamanannya berbeda, pola persebaran tiap model terhadap skala *discomfort hour* tidak jauh berbeda.

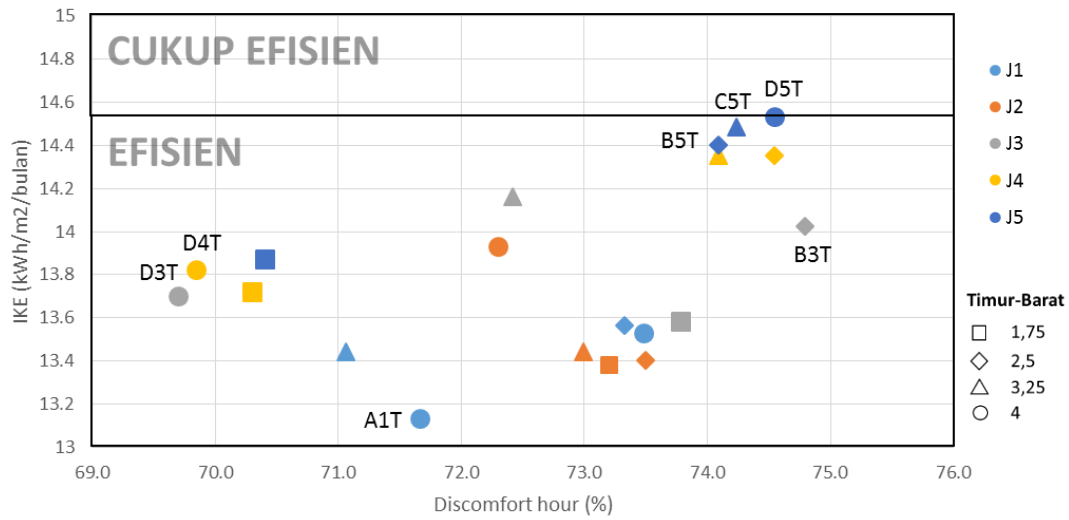
Gambar 5.24 menunjukkan posisi tiap model eksperimen pada kuadran evaluasi. Dengan indikator IKE, hampir semua model tergolong efisien. Hanya 1 model yang tergolong cukup efisien, yaitu D5T (14,53 kWh/m²/bulan). D5T memiliki aspek rasio 4:1 dan luas jendela J5 (69.1 m²) dengan sisi panjang bangunan menghadap Timur-Barat. Total radiasi matahari yang diterima model ini saat bulan terdingin sebesar 2789,86 kW. Nilai tersebut tertinggi dibandingkan model eksperimen lainnya sehingga energi pendinginan yang dibutuhkan tinggi saat moda aktif.



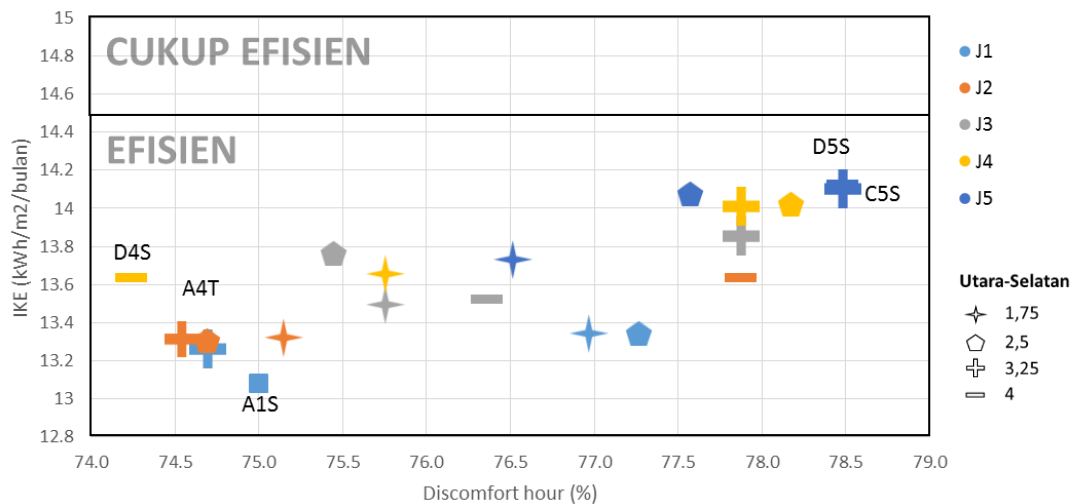
Gambar 5. 24 Kuadran optimasi dengan parameter standar IKE dan SNI

Posisi model eksperimen dengan orientasi Timur-Barat pada kuadran optimasi ditunjukkan oleh gambar 5.25. Model dengan luas jendela yang kecil (J1 dan J2) memiliki IKE yang rendah. Model A1T dengan bentuk ter-kompak (aspek rasio 1,75) dan luas jendela terkecil J1 (34.6 m^2) memiliki IKE terendah sebesar $13,13 \text{ kWh/m}^2/\text{bulan}$. Semakin luas jendela, posisi model pada kuadran bergeser ke atas yang menunjukkan peningkatan IKE. Di sisi lain, jendela yang luas dapat menurunkan presentase waktu tidak nyaman karena meningkatnya potensi penghawaan. Model dengan luas jendela 3 (D3T) dan 4 (D4T) memiliki *discomfort hour* yang rendah, masing-masing 69,7% dan 69,8%. Kedua model tersebut memiliki aspek rasio memanjang dan jendela yang cukup besar yang menghasilkan presentase waktu nyaman yang rendah saat moda pasif.

Gambar 5.26 menunjukkan posisi model eksperimen berorientasi Utara-Selatan pada kuadran optimasi. IKE terendah dimiliki model dengan bentuk kompak dan luas jendela terkecil J1, yaitu $13,08 \text{ kWh/m}^2/\text{bulan}$. Semakin tinggi luas jendela, posisi model di kuadran bergeser ke kanan atas. Hal tersebut menunjukkan IKE bertambah dan presentase waktu di luar rentang nyaman SNI meningkat. D5S dan C5S merupakan model dengan *discomfort hour* tertinggi yaitu 78,5%. Keduanya menerima radiasi matahari tertinggi dibandingkan model orientasi Utara-Selatan lainnya, masing-masing 2275,3 dan 2306,8 kW.



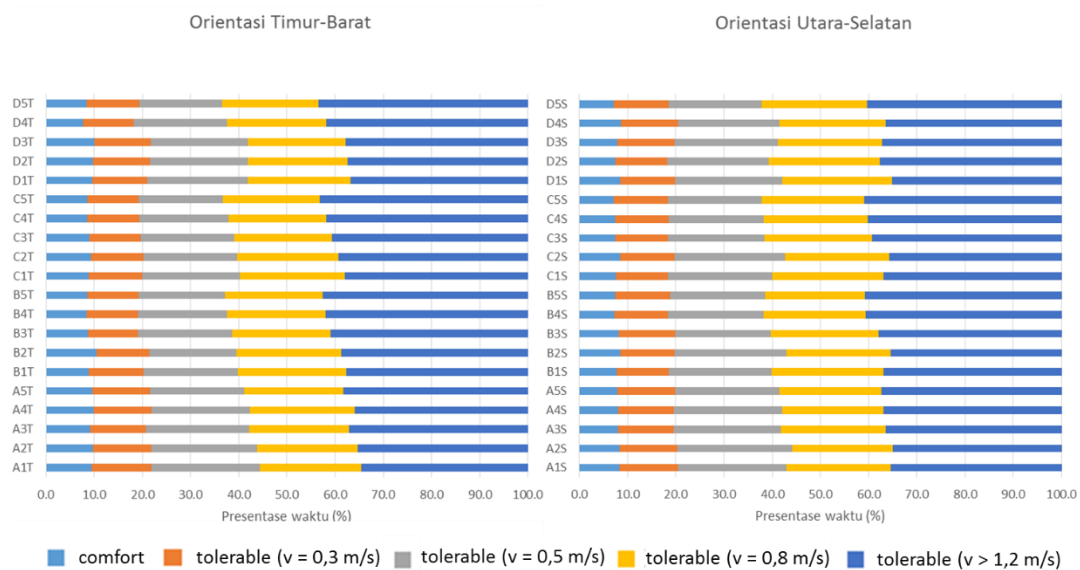
Gambar 5. 25 Model dengan orientasi Timur-Barat pada kuadran optimasi



Gambar 5. 26 Model dengan orientasi Utara-Selatan pada kuadran optimasi

Hasil optimasi dengan parameter standar IKE dan SNI tidak jauh berbeda dengan hasil optimasi dengan parameter *base case*. Berdasarkan parameter standar IKE dan SNI, model dengan kinerja terbaik adalah D3T untuk *discomfort hour* terendah (69,7%) dan A1S (13,08 kWh/m²/bulan) untuk IKE ter-efisien dibanding model lainnya. Bila dibandingkan, nilai IKE D3T lebih rendah 4,74% dari A1S sementara *discomfort hour* A1S lebih rendah 7,61% dari D3T. Karena perbedaan IKE yang lebih tidak signifikan, D3T dinyatakan sebagai model dengan kinerja terbaik berdasarkan parameter standar IKE dan SNI.

Zona nyaman dapat diperluas dengan bantuan kecepatan angin. Gambar 5.27 menunjukkan presentase waktu kondisi nyaman serta *tolerable* dengan kebutuhan kecepatan angin tertentu. Di atas 30°C, dibutuhkan kecepatan angin minimum 1,2 m/s untuk mewujudkan kenyamanan termal (Building and Construction Authority, 2010). Pada orientasi Timur-Barat, presentase waktu kondisi *tolerable* terbanyak ditemukan pada model A1T (aspek rasio 1,75 luas jendela J1). Sebanyak 12,5% dan 22,4% dari total waktu dapat menjadi nyaman dengan kecepatan angin masing-masing 0,3 m/s dan 0,5 m/s. Hal ini mengindikasikan waktu penggunaan moda aktif pada model A1T dapat diperpendek dengan meningkatkan kecepatan angin dalam ruang. Kondisi sebaliknya ditemukan pada model D5T (aspek rasio 4 luas jendela J5). Kondisi *tolerable* dengan kebutuhan angin di bawah 1,2 m/s pada model D5T lebih rendah dari model lainnya. Kecepatan angin di atas 1,2 m/s dibutuhkan untuk mewujudkan kenyamanan termal selama 43,5% dari total waktu.



Gambar 5. 27 Presentase waktu pada kondisi termal tertentu

Pada model dengan orientasi Utara-Selatan, presentase waktu kondisi *tolerable* terbanyak ditemukan pada model A1S dan A2S. Pada model A1S, sebanyak 12,2% dan 22,4% dari total waktu dapat menjadi nyaman dengan kecepatan angin masing-masing 0,3 m/s dan 0,5 m/s. Pada model A2S, sebanyak

12,1% dan 23,8% dari total waktu dapat menjadi nyaman dengan kecepatan angin masing-masing 0,3 m/s dan 0,5 m/s. Presentase waktu kondisi *tolerable* dengan kebutuhan kecepatan angin di atas 1,2 m/s terbanyak ditemukan pada model C5S (aspek rasio 3,25 luas jendela 5). Sebanyak 40,9% dari total waktu membutuhkan kecepatan angin di atas 1,2 m/s untuk menjadi nyaman.

Dengan rentang nyaman yang semakin luas saat moda pasif, waktu pemanfaatan moda aktif dapat diperpendek. Dampaknya, energi pendinginan dapat ditekan. Analisis menunjukkan potensi yang besar untuk memperluas rentang nyaman pada model dengan aspek rasio dan luas jendela kecil (AR 1,75 luas jendela J1). Angin dengan kecepatan 0,3 m/s dan 0,5 m/s dibutuhkan untuk mewujudkan kondisi *tolerable*. Sebaliknya, semakin panjang bangunan dan semakin besar luas jendela, diperlukan kecepatan angin yang lebih tinggi ($> 1,2$ m/s) untuk mewujudkan kondisi *tolerable*. Namun, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui kinerja kecepatan angin tiap bangunan.

5.5 Rangkuman

Bab ini menjawab pertanyaan penelitian pertama dengan membahas pengaruh konfigurasi selubung bangunan (aspek rasio, luas jendela, dan orientasi) terhadap kinerja termal dan energi bangunan pendidikan dengan sistem penghawaan hibrida di iklim tropis lembab. Pengaruh aspek rasio terhadap energi pendinginan dan *discomfort hour* berbeda pada tiap luas jendela sehingga dapat dikatakan pengaruh luas jendela lebih signifikan. Peningkatan aspek rasio berbanding lurus dengan peningkatan penerimaan panas oleh selubung bangunan (Markus & Morris, 1980). Namun peningkatan aspek rasio dengan luas jendela tetap, menurunkan WWR (*Window to Wall Ratio*). Beberapa peneliti melaporkan hubungan yang kuat antara WWR dan kebutuhan energi pendinginan (Cheung dkk, 2005; Eskin dan Turkmen, 2008). Hal ini terlihat pada eksperimen ini dimana dengan luas jendela J3 dan J4, peningkatan aspek rasio dari 3,25 ke 4 tidak lagi meningkatkan energi pendinginan. Begitu pula pengaruh aspek rasio terhadap kenyamanan termal yang tidak general karena pengaruh jendela.

Pengaruh luas jendela terlihat jelas dimana peningkatan luas jendela pada semua aspek rasio meningkatkan energi pendinginan. Radiasi matahari yang

diterima melalui jendela merupakan sumber panas yang mempengaruhi kinerja termal bangunan (Lu, Li, dan Zhao, 2015). Peningkatan luas jendela juga berdampak pada peningkatan pelepasan panas melalui penghawaan (Longo, Melo, dan Ghisi, 2011). Namun, peningkatan luas jendela saat moda pasif tidak selalu dapat mengkompensasi peningkatan temperatur udara karena penambahan panas yang diterima (Liping dan Hien, 2007). Hal tersebut terlihat saat peningkatan luas jendela mampu menurunkan *discomfort hour* pada model dengan orientasi Timur-Barat sementara *discomfort hour* bertambah pada model dengan orientasi Utara-Selatan. Orientasi berperan mempengaruhi jumlah dan durasi radiasi matahari yang diterima bangunan (Emuwa, 2016). Orientasi terhadap arah angin juga mempengaruhi efektivitas penghawaan dalam meningkatkan kenyamanan termal (Aldawoud, 2016).

Bab ini juga menjawab pertanyaan penelitian kedua mengenai konfigurasi selubung bangunan pendidikan dengan sistem penghawaan hibrida teroptimum untuk iklim tropis lembab. Optimasi bagian pertama dilakukan dengan parameter *base case*. Posisi optimum menunjukkan energi pendinginan yang rendah saat moda aktif dan *discomfort hour* yang rendah saat moda pasif. Sementara pada bagian kedua, optimasi dilakukan dengan parameter standar IKE (Intensitas Konsumsi Energi) dan SNI. Kondisi optimum dicapai saat IKE tergolong efisien dan *discomfort hour* rendah.

Posisi tiap model eksperimen pada kedua kuadran optimasi tersebut tidak berbeda jauh. Model dengan aspek rasio rendah dan luas jendela kecil memiliki energi pendinginan yang rendah. Sebaliknya model dengan aspek rasio tinggi dan jendela yang luas memiliki energi pendinginan tinggi. Model dengan aspek rasio yang tinggi, luas jendela yang besar, dan berorientasi Timur-Barat memiliki presentase waktu tidak nyaman yang rendah. Sebaliknya, model dengan aspek rasio rendah, luas jendela kecil, dan berorientasi Utara-Selatan memiliki *discomfort hour* yang lebih rendah. Berdasarkan kuadran optimasi pertama, model D4T (aspek rasio 4 luas jendela 60,5 m² atau WWR 31,5%) memiliki kinerja terbaik saat moda aktif maupun pasif. Dibandingkan *base case*, D4T mampu menurunkan energi pendinginan sebesar 9,3% dan *discomfort hour* 4,3%. Sementara berdasarkan kuadran optimasi kedua, kinerja D4T sedikit lebih buruk dari D3T (aspek rasio 4

luas jendela $51,8 \text{ m}^2$ atau WWR 27%) yang memiliki IKE $13,7 \text{ kWh/m}^2/\text{bulan}$ dan *discomfort hour* 69,7%. Selain itu, kondisi termal bangunan dapat dibagi menjadi kondisi nyaman maupun *tolerable* dengan kebutuhan kecepatan angin tertentu. Potensi yang besar untuk memperluas rentang nyaman pada model dengan aspek rasio dan luas jendela kecil (AR 1,75 luas jendela J1). Dengan rentang nyaman yang semakin luas saat moda pasif, waktu pemanfaatan moda aktif dapat diperpendek dan energi pendinginan menurun. Namun, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui kinerja kecepatan angin tiap bangunan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh desain selubung bangunan terhadap kinerja termal dan energi bangunan akibat peralihan dari sistem penghawaan alami menjadi sistem penghawaan hibrida. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan merumuskan konfigurasi selubung bangunan pendidikan berpenghawaan hibrida yang menghasilkan kinerja termal yang baik serta efisien terhadap energi dalam konteks iklim tropis lembab. Variabel yang diuji dalam studi ini adalah aspek rasio, luas jendela serta orientasi. Evaluasi kinerja termal menggunakan indikator *discomfort hour* (sesuai rekomendasi ASHRAE 55-2004) saat moda pasif dan energi pendinginan (kWh) saat moda aktif. Tiap model diuji ketika memanfaatkan penghawaan alami secara penuh dalam suatu kurun waktu. Dalam kurun waktu yang sama, bangunan kembali diuji saat memanfaatkan penghawaan mekanis.

6.1.1 Kinerja model eksperimen

Peningkatan energi pendinginan bervariasi antara 0,2 – 6,18% saat aspek rasio meningkat dari 1,75 menjadi 4 dengan interval 0,75. Dengan interval yang sama meningkat 0,2 – 2,1% pada model dengan luas jendela J1 (34,6 m²) dan J2 (43,2 m²). Sementara pada J3 (51,8 m²) dan J4 (60,5 m²) peningkatan aspek rasio dapat menurunkan *discomfort hour* 0,2 – 3,4%.

Tiap peningkatan luas jendela sebesar 20%, energi pendinginan meningkat 4 – 5,9% saat bulan terdingin dan 0,4 – 6,6% saat bulan terpanas untuk orientasi Timur-Barat. Sementara *discomfort hour* berkurang 0,2 – 5,2%. Pada orientasi Utara-Selatan, peningkatan luas jendela sebesar 20% meningkatkan energi pendinginan sebesar 0,1 – 4,4% di bulan terdingin dan 0,2 – 3,9% di bulan terpanas. Namun *discomfort hour* saat moda pasif meningkat hingga 2,4%.

6.1.2 Pengaruh desain selubung bangunan bersistem penghawaan hibrida

a. Aspek rasio

Pada studi ini, aspek rasio didefinisikan sebagai perbandingan sisi panjang bangunan (L) dengan sisi lebar (W), sementara ketinggian (H) dan volume bangunan konstan. Aspek rasio yang diuji adalah 1,75 hingga 4 dengan interval 0,75. Peningkatan energi pendinginan bervariasi antara 0,2 – 6,18% saat aspek rasio meningkat dari 1,75 menjadi 4 dengan interval 0,75. Sementara peningkatan aspek rasio dengan interval 0,75 meningkatkan *discomfort hour* 0,2 – 3,4%. Penambahan aspek rasio meningkatkan perpindahan panas pada luas selubung (Markus & Morris, 1980). Pada iklim tropis, umumnya temperatur udara luar lebih tinggi dari dalam ruang sehingga panas dari lingkungan berpindah ke bangunan (Hyde, 2007). Oleh karena itu, model ter-kompak (aspek rasio 1,75) memiliki energi pendinginan terendah dibandingkan model lainnya.

Di sisi lain peningkatan aspek rasio dengan luas jendela tetap, menurunkan WWR (*Window to Wall Ratio*). Beberapa studi sebelumnya melaporkan peningkatan WWR meningkatkan kebutuhan energi pendinginan (Cheung dkk, 2005; Eskin dan Turkmen, 2008). Hal ini yang mengakibatkan pada luas jendela J3 (51,8 m²) dan J4 (60,5 m²) peningkatan aspek rasio dari 3,25 ke 4 tidak lagi meningkatkan energi pendinginan. Presentase waktu tidak nyaman juga meningkat karena WWR berkurang saat moda pasif. Namun penambahan aspek rasio mengakibatkan kedalaman kelas berkurang sehingga jarak antara *inlet* dan *outlet* menjadi dekat dan penghawaan silang menjadi efektif (Aldawoud, 2016). Oleh karena itu, model dengan aspek rasio 4 memiliki kinerja termal yang lebih baik. Pada kasus ini terlihat luas jendela lebih mempengaruhi kinerja bangunan dibandingkan aspek rasio.

Hasil ini mem-validasi studi Inanici dan Demirbilek (2000) yang melaporkan perbaikan beban pendinginan 3 – 6% saat aspek rasio meningkat dari 1 ke 2 dengan interval 0,2. Perubahan aspek rasio tidak menunjukkan pola yang general terhadap kinerja energi pendinginan dan *discomfort hour* karena pengaruh luas jendela lebih besar. Pengaruh aspek rasio lebih besar terhadap perubahan energi pendinginan saat moda aktif (variasi 0,2 – 6,18%) dibandingkan *discomfort hour* saat moda pasif (variasi 0,2 – 3,4%).

b. Luas jendela

Luas jendela yang diuji dalam studi ini adalah panjang x lebar jendela, termasuk kusen. Sebagai variabel kontrol luas kaca diasumsikan sama dengan luas bukaan (semua jendela diasumsikan jendela kaca *operable*). Luas jendela yang diuji adalah J1 hingga J5 (WWR 20% hingga 40% dengan interval 5% untuk aspek rasio 3,25). Peningkatan luas jendela sebesar 100% meningkatkan energi pendinginan 6,5 – 11,2% dan 5,7 – 7,4% masing-masing pada model dengan orientasi Timur-Barat dan Utara-Selatan. Luas jendela mempengaruhi radiasi matahari yang diterima bangunan (Lu, Li, dan Zhao, 2015). *Elemental breakdown* menunjukkan radiasi matahari melalui jendela merupakan sumber penerimaan panas terbesar kedua setelah atap dan langit-langit. Peningkatan luas jendela sebesar 100% (J1 ke J5) meningkatkan radiasi panas yang diterima bangunan 84,6 – 126,3%. Studi ini menunjukkan hubungan radiasi matahari yang diterima melalui jendela dengan kebutuhan energi pendinginan sangat kuat ($R^2 = 0,96$).

Saat moda pasif, jendela berperan sebagai bukaan sehingga peningkatan luas jendela meningkatkan potensi pelepasan panas melalui penghawaan (Longo, Melo, dan Ghisi, 2011). Peningkatan luas jendela sebesar 100% meningkatkan pelepasan panas melalui penghawaan sebesar 34,09 – 42,35%. Namun, peningkatan luas jendela saat moda pasif tidak selalu dapat mengkompensasi peningkatan temperatur udara karena penambahan panas yang diterima (Liping dan Hien, 2007). Hal ini terlihat saat peningkatan luas jendela mampu menurunkan *discomfort hour* 0,78 – 4,53% pada model dengan orientasi Timur-Barat sementara *discomfort hour* bertambah 1,28 – 2,37% pada model dengan orientasi Utara-Selatan. Timur-Barat merupakan arah angin dengan frekuensi tersering di Surabaya.

Hasil penelitian ini sejalan dengan studi Inanici dan Demirbilek (2000), yang melaporkan peningkatan luas jendela yang menghadap selatan (*south window size*) pada bangunan tiga lantai meningkatkan beban pendinginan pada konteks iklim panas dan lembab (Antalya, Turki). Hasil yang sama diungkapkan oleh *Organization of American States* (2013). Dalam studi dengan konteks iklim tropis lembab tersebut, perubahan WWR dari 20% menjadi 80% meningkatkan energi pendinginan sebesar 34%. Peningkatan energi pendinginan dalam studi ini tidak

signifikan studi tersebut karena konteks bangunan bertingkat rendah dan berpeneduh (*horizontal lovers*).

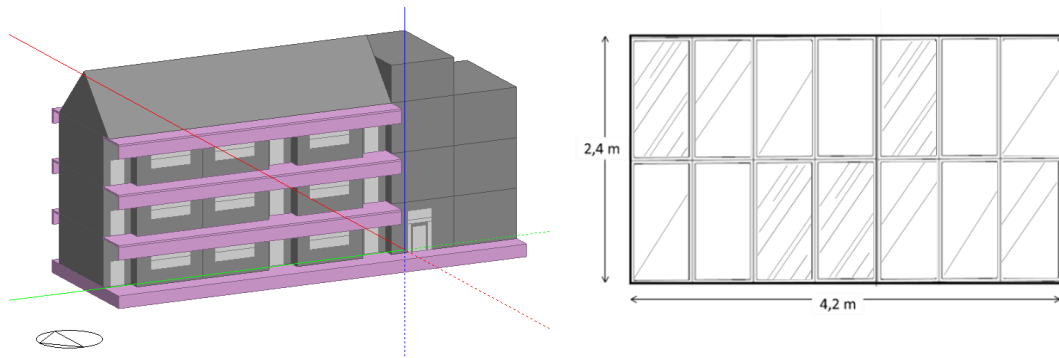
c. Orientasi

Pada studi ini, orientasi menunjukkan arah hadap sisi panjang bangunan (sisi dengan jendela). Dua orientasi yang diuji adalah Timur-Barat dan Utara-Selatan. Energi pendinginan yang dibutuhkan model dengan orientasi Timur-Barat selalu lebih tinggi 0,4 - 7,24% dari Utara-Selatan. Orientasi berperan mempengaruhi jumlah dan durasi radiasi matahari yang diterima bangunan (Emuwa, 2016). Timur-Barat merupakan sisi yang menerima radiasi matahari terbesar di iklim tropis (Szokolay, 2004; Hyde, 2007). Hasil studi ini menunjukkan radiasi matahari yang diterima model dengan orientasi Timur-Barat lebih tinggi 6,37 - 22,78% dari Utara-Selatan. Di sisi lain, orientasi terhadap arah angin mempengaruhi efektivitas penghawaan dalam meningkatkan kenyamanan termal (Aldawoud, 2016). Pada konteks Surabaya, Timur dan Barat merupakan arah datang angin dengan frekuensi tertinggi. Jumlah panas yang dilepas melalui penghawaan model dengan orientasi Timur-Barat lebih tinggi 12,29 - 25,76% dari Utara-Selatan. Hal ini mengakibatkan model dengan orientasi Utara-Selatan memiliki *discomfort hour* yang lebih tinggi 3,6 - 13,4% dari Timur-Barat. Orientasi memiliki pengaruh yang bertolak belakang terhadap energi pendinginan dan *discomfort hour*. Namun, pengaruh terhadap *discomfort hour* (variasi 3,6 - 13,4%) lebih signifikan dari energi pendinginan (variasi 0,4 - 7,24%) sehingga orientasi yang lebih sesuai untuk menerapkan sistem penghawaan hibrida adalah Timur-Barat. Meskipun begitu, diperlukan penelitian lebih lanjut terkait durasi penggunaan moda pasif dan aktif pada bangunan berpenghawaan hibrida dalam sehari.

6.1.3 Konfigurasi teroptimum

Kondisi *base case* menjadi parameter optimasi bagian pertama. *Base case* berorientasi Timur-Barat dengan aspek rasio 3,25 dan luas jendela 4,41 m² atau WWR 25,6% (WWR jendela *operable* 16,6%, *non-operable* 9%). *Base case* memiliki kebutuhan energi pendinginan 7230,3 kWh saat moda aktif dan

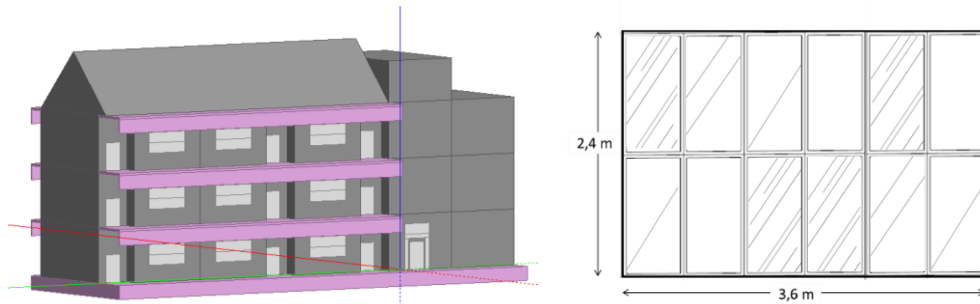
discomfort hour 76,9% saat moda pasif. Terdapat 6 model yang memiliki performa yang lebih baik dari *base case*, yaitu D4T, D3T, C4T, B5T, C5T, dan D5T. Keenamnya memiliki jendela yang luas (J3, J4, J5) dan aspek rasio yang tinggi. Hal ini menunjukkan bangunan memanjang (aspek rasio tinggi) dengan jendela yang luas lebih sesuai untuk menerapkan moda pasif maupun aktif. Keenamnya memiliki sisi panjang menghadap Timur-Barat yang merupakan arah angin utama pada konteks Surabaya. Dari keenamnya, D4T (aspek rasio 4, luas jendela 60,5 m² atau WWR 31,5%) mampu menurunkan energi pendinginan sebesar 9,3% dan *discomfort hour* 4,3%. Gambar 6.1 menunjukkan model D4T.



Gambar 6. 1 Model D4T dan konfigurasi jendela

Optimasi bagian kedua menggunakan parameter standar IKE (Intensitas Konsumsi Energi) dan SNI 6390 – 2011. IKE didefinisikan sebagai besar energi yang digunakan suatu bangunan gedung perluas area yang dikondisikan dalam satu bulan atau satu tahun (Peraturan Gubernur No. 38 tahun 2012). Nilai IKE semua model yang diuji, 156,96 – 174,36 kWh/m²/tahun, memenuhi standar yang direkomendasikan Peraturan Gubernur No. 38 tahun 2012 (195 – 265 kWh/m²/tahun). Hasil optimasi dengan parameter standar IKE dan SNI tidak jauh berbeda dengan hasil optimasi dengan parameter *base case*. Berdasarkan parameter standar IKE dan SNI, model dengan kinerja terbaik adalah D3T (aspek rasio 4 luas jendela 51,8 m² atau WWR 27%) yang memiliki IKE 13,7 kWh/m²/bulan dan *discomfort hour* 69,7%. D4T memiliki kinerja sedikit lebih buruk dari D3T (IKE 13,82 kWh/m²/bulan, *discomfort hour* 69,8%). Perbedaan hasil antara optimasi bagian pertama dan kedua diakibatkan rentang nyaman SNI menggunakan indikator

temperatur udara sementara ASHRAE menggunakan temperatur operatif (kombinasi temperatur udara dan MRT). Secara umum, pola persebaran tiap model pada kuadran optimasi tidak jauh berbeda.



Gambar 6. 2 Model D3T dan konfigurasi jendela

6.2 Saran

Beberapa hal yang dapat dikembangkan dari penelitian ini antara lain:

1. Menguji model yang mengkombinasikan penghawaan alami dan AC. Studi ini hanya mempelajari kinerja bangunan saat menggunakan penghawaan alami dan AC secara terpisah.
2. Mengembangkan studi dengan mempertimbangkan efek pendinginan fisiologis oleh angin. Dengan memperhitungkan efek pendinginan fisiologis oleh angin, zona/rentang nyaman menjadi lebih luas.

Berdasarkan hasil penelitian, saran yang diberikan untuk bangunan perguruan tinggi yang awalnya dirancang berpenghawaan alami yang akan beralih menerapkan sistem penghawaan hibrida adalah:

1. Bentuk geometri yang disarankan untuk bangunan perguruan tinggi yang akan beralih memanfaatkan sistem penghawaan hibrida adalah aspek rasio 4:1 (L/W) dengan luas jendela $60,5 \text{ m}^2$ (WWR 31,5%). Konfigurasi tersebut menghasilkan kebutuhan energi pendinginan $6630,6 \text{ kWh}$ saat moda aktif dan *discomfort hour* 78,7 saat moda pasif.
2. Menghadapkan sisi terpanjang bangunan (sisi dengan jendela) ke arah datang angin. Untuk kontes Surabaya, orientasi yang disarankan Timur dan Barat.

3. Berdasarkan analisis rata-rata temperatur operatif per jam, tabel 6.1 menunjukkan rekomendasi penerapan moda pasif dan aktif untuk bangunan berorientasi Timur-Barat dengan sistem penghawaan hibrida.

Tabel 6. 1 Rekomendasi penerapan moda pasif dan aktif pada bangunan berorientasi Timur-Barat

BULAN TERDINGIN									
	08.00	09.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00
LT 1									
LT 2									
LT3									
BULAN TERPANAS									
LT 1									
LT 2									
LT3									
keterangan:									
	: moda pasif					: moda aktif			

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Aflaki. (2015). A review on natural ventilation applications through building facade components and ventilation openings in tropical climates. *Energy and Buildings*.
- Aldawoud, A. (2016). Windows design for maximum cross-ventilation in buildings. *Advances in Building Energy Research*.
- Al-Najem, A. (2010). The Effects of Orientation, Ventilation, and Varied WWR on the Thermal Performance of Residential Rooms in the Tropics. *www.ccsenet.org*.
- Al-Tamimi, N., & Fadzil, S. F. (2012). Energy-efficient envelope design for high-rise residential buildings in Malaysia. *Architectural Science Review* 55, 119-127.
- Appah-Dankyi, J., & Christian, K. (2012). An assessment of thermal comfort in a warm and humid school building at Accra, Ghana. *Advances in Applied Science Research*, 535-547.
- Arifin, N. A., & Denan, Z. (2015). An Analysis of Indoor Air Temperature and Relative Humidity in Office Room with Various External Shading Devices in Malaysia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 179, 290-296.
- Awbi, H. (2007). *Ventilation Systems*. Taylor & Francis e-Library.
- Aynsley, R., Melbourne, W., & Vickery, B. (1977). *Architectural Aerodynamics*. London: Applied Science Publishers Ltd.
- Badan Koordinasi, Pengendalian, dan Komunikasi Program. (2015). *Laporan Tahunan ITS*. Surabaya: ITS.
- Badan Pusat Statistik Kota Surabaya. (2016). *Kota Surabaya dalam Angka*. Surabaya: Badan Pusat Statistik Kota Surabaya.
- Ben-David, T., & Waring, M. S. (2016). Impact of natural versus mechanical ventilation on simulated indoor air quality and energy consumption in offices in fourteen U.S. cities. *Building and Environment* 104, 320-336.
- Brager, G., & Baker, L. (2009). Occupant satisfaction in mixed-mode buildings. *Building Research & Information* 37, 369-380.
- Brager, G., Borgeson, S., & Lee, Y. S. (2007). *Control Strategies for Mixed-Mode Buildings*. California: Center for the Built Environment (CBE).
- Building and Construction Authority. (2010). *Building Planning and Massing*. Singapore: The Centre for Sustainable Buildings and Construction .
- Chan, K., & Chow, W. (1998). Energy impact of commercial-building envelopes in the sub-tropical climate. *Applied Energy* 60, 21-39.

- Cheung, C., Fuller, R., & Luther, M. (2005). Energy-efficient envelope design for high-rise apartments. *Energy and Buildings* 37, 37-48.
- Chisholm, E. (2015). Hybrid Ventilation: Software Coupling for the Analysis of a Mixed Mode Design in a Tropical Monsoon Climate. *14th Conference of International Building Performance Simulation Association*, (pp. 875 - 882). Hyderabad, India.
- Damiati, S., Zaki, S., Rijal, H., & Wonorahardjo, S. (2016). Field study on adaptive thermal comfort in office buildings in Malaysia, Indonesia, Singapore, and Japan during hot and humid season. *Building and Environment*.
- Emuwa, U. O.-G. (2016). *Impact of window walls on thermal comfort and energy efficiency in condominium buildings: an experimental study in toronto*. Toronto: Ryerson University.
- Fairuz, S., Fadzil, S., & Hugh, B. (2014). *Energy and Building Control Systems in the Tropics*. Malaysia: Penerbit Universiti Sains Malaysia.
- Fallahtafti, R., & Mahdavinejad, M. (2015). Optimisation of building shape and orientation for better energy efficient architecture. *International Journal of Energy Sector Man*, 593-618.
- Fisk, W. (2002). How IEQ affects health, productivity. *ASHRAE Journal-American Society of Heating Refrigerating and Airconditioning Engineers*, 56-60.
- Ghisi, E., & Rupp, R. F. (2012). Sizing Window Areas for Daylighting and Hybrid Ventilation in Commercial Building. *PLEA*. Lima, Peru.
- Givoni, B. (2011). Indoor temperature reduction by passive cooling systems. *Solar Energy* 85 , 1692 - 1726.
- Groat, L., & Wang, D. (2013). *Architectural Research Methods*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Gupta. (2017). Window Design for Natural Ventilation-Tropical Region. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)* 5, 548 - 558.
- Heerwagen, D. (2004). *Passive and Active Environmental Controls: Informing the Schematic Designing of Buildings*. Boston: McGraw Hill.
- Hildebrand, P. W. (2012). Shading and Cooling: Impacts of Solar Control and Windows on Indoor Airflow. *Center for the Built Environment UC Berkeley*.
- Hyde, R. (2007). *Bioclimatic Housing: Innovative Design for Warm Climates*. UK: Cromwell Press.

- Inanici, M., & Demirbilek, F. (2000). Thermal performance optimization of building aspect ratio and south window size in five cities having different climatic characteristics of Turkey. *Building and Environment* 35, 41-52.
- JICA. (2009). *A Study of Electricity Use in Jakarta*.
- Karava, P., Athienitis, A., & Stathopoulos, T. (2012). Experimental study of the thermal performance of a large institutional building with mixed-mode cooling and hybrid ventilation. *Building and Environment* 57, 313-326.
- Khamporn, N., & Chaiyapinunt, S. (2014). An Investigation on the Human Thermal Comfort from a Glass Window. *Engineering Journal* 18, 26-43.
- Koenigsberger, O., Ingersoll, T., Mayhew, A., & Szokolay, S. (1974). *Manual of Tropical Housing and Building Part one: Climatic design*. London: Longman Group Limited.
- Lau, A. K., Salleh, E., Lim, C. H., & Sulaiman, M. Y. (2016). Potential of shading devices and glazing configurations on cooling energy savings for high-rise office buildings in hot-humid climates: The case of Malaysia. *International Journal of Sustainable Built Environment* 5, 387-399.
- Lechner, N. (2001). *Heating, Cooling, Lighting: Design Methods for Architects*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Liddament, M. W. (1996). *A Guide to Energy Efficient Ventilation*. Great Britain: University of Warwick Science Park.
- Ling, C. S., Ahmad, M. H., & Ossen, D. R. (2007). The Effect of Geometric Shape and Building Orientation on Minimising Solar Insolation on High-Rise Buildings in Hot Humid Climate. *Journal of Construction in Developing Countries* 12 No. 1.
- Liping, W., & Hien, W. N. (2007). The impacts of ventilation strategies and facade on indoor thermal environment for naturally ventilated residential buildings in Singapore. *Building and Environment* 42, 4006-4015.
- Longo, T. A., Melo, A. P., & Ghisi, E. (2011). Thermal Comfort Analysis of a Naturally Ventilated Building. *12th Conference of International Building Performance Simulation Association* (pp. 2004-2010). Sydney: Proceedings of Building Simulation.
- Lu, S., Li, Z., & Zhao, Q. (2015). Thermal Process of Windows in Hot Summer and Cold Winter. *International Conference on Building Energy and Environment (COBEE)* (pp. 1788 – 1794). Elsevier.
- Markus, T., & Morris, E. (1980). *Buildings, Climate and Energy*. London: Pitman Publishing Limited.

- Masjuki, H., Mahlia, T., & Choudhur, I. (2001). Potential Electricity Savings by Implementing Minimum Energy Efficiency Standards for Room Air Conditioners in Malaysia. *Energy Conversion Management* 42, 439-450.
- Mirrahimi, S., Mohamed, M. F., Haw, L. C., Ibrahim, N. L., Yusoff, W. F., & Aflaki, A. (2016). The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot-humid climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53, 1508-1519.
- Moore, D. S., Notz, W. I., & Flinger, M. A. (2013). *The Basic Practice of Statistics (6th ed)*. New York: W.H. Freeman and Company.
- Moore, F. (1993). *Environmental Control Systems: Heating Cooling Lighting*. USA: McGraw-Hill Inc.
- Mumovic, D., & Santamouris, M. (2009). *A Handbook of Sustainable Building Design & Engineering*. UK: Earthscan.
- Organization of American States. (2013). Energy Efficiency Guidelines for Office Buildings in Tropical Climates. Department of Sustainable Development.
- Pusat Teknologi Sumber Daya Energi dan Industri Kimia (PTSEIK). (2017). *Outlook Energi Indonesia 2017*. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT).
- Puteh, M., Ibrahim, M., Adnan, M., Cheahmad, C., & Noh, M. (2012). Thermal comfort in classroom: constraints and issues. *Procedia – Social and Behavioural Sciences* 46, 1834-1838.
- Riley, M., Cotgrave, A., & Farragher, M. (2017). *Building Design, Construction and Performance in Tropical Climates*. New York: Routledge.
- Ruiz, G. R., & Bandera, C. F. (2017). Validation of Calibrated Energy Models: Common Errors. *Energies*.
- Sacht, H., & Lukiantchuki, M. A. (2017). Windows Size and the Performance of Natural Ventilation. *Creative Construction Conference* (pp. 972-979). Primosten: Procedia Engineering.
- Salcido, J., Raheem, A. A., & Issa, R. R. (2016). From simulation to monitoring: Evaluating the potential of mixed-mode ventilation (MMV) systems for integrating natural ventilation in office buildings through a comprehensive literature review. *Energy and Buildings* 127, 1008–1018.
- Santamouris, M., & Wouters, P. (2006). *Building Ventilation, The State of The Art*. London: Earthscan.
- Szokolay, S. V. (2004). *Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design*. Oxford: Architectural Press.

- Tantasavasdi, C., Srebric, J., & Chen, Q. (2001). Natural Ventilation Design for Houses in Thailand. *Energy and Buildings* 33, 815-824.
- Tenorio, R. (2002). Dual mode cooling house in the warm humid tropics . *Solar Energy* 73, 43–57.
- Tzonis, A., Lefaivre, L., & Stagno, B. (2001). *Tropical Architecture: Critical Regionalism in the Age of Globalization*. West Sussex: Wiley Academy.
- U.S. Department of Energy. (2004). *Energy Design Guidelines for High Performance School: Tropical Island Climates*.
- Vanhoutteghem, L., Skarning, G. C., Hviid, C. A., & Svend, S. (2015). Impact of façade window design on energy, daylighting and thermal comfort in nearly zero-energy houses. *Energy and Buildings* 102, 149-156.
- Wang, J. C. (2016). A study on the energy performance of school buildings in Taiwan. *Energy and Buildings* 133, 810-822.
- Ward, J., Wall, J., & Perfumo, C. (2012). Environmentally active buildings: the controls challenge. *Architectural Science Review* 55, 26-34.
- WBCSD. (2008). *Energy efficiency in buildings; Business realities and opportunities*. Switzerland.
- WHO. (2009). *Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings*. Retrieved from NCBI: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK143274/>
- Wong, N., & Li, S. (2007). A study of the effectiveness of passive climate control in naturally ventilated residential buildings in Singapore. *Building and Environment* 42, 1395–1405.
- Wouters, P., Heijmans, N., Delmotte, C., & Vandaele, L. (1999). Classification of Hybrid Ventilation Concepts. *The Second International Forum on Natural and Hybrid Ventilation*. Sydney: HybVent Forum 99.
- Zhang, A., Bokel, R., Dobbelsteen, A., Sun, Y., Huang, Q., & Zhang, Q. (2017). The Effect of Geometry Parameters on Energy and Thermal Performance of School Buildings in Cold Climates of China. *Sustainability*.
- Zhang, J., Wong, N. H., & Hii, D. J. (2015). The Relationship between Building Form Typology and Cooling Loads in the Tropical Climatic Context. *Passive and Low Energy Architecture (PLEA)*. Bologna.

LAMPIRAN

Lampiran 1: Data iklim makro dan mikro Surabaya (19 – 21 Februari 2018)

	Iklim makro (BMKG II Perak)			Iklim mikro (pengukuran <i>outdoor</i>)		
	T (°C)	RH (%)	Kec. angin (m/s)	T (°C)	RH (%)	Kec. angin (m/s)
19/02/18						
7:00	27.6	86.7	0.18			
8:00	29	80.2	0.38			
9:00	30.4	75.6	0.30			
10:00	31.4	71.7	0.29			
11:00	32.4	68.1	0.38			
12:00	33.4	63.1	0.77			
13:00	34.6	58.5	0.68			
14:00	34.2	62.5	0.67			
15:00	32	67.9	0.42			
16:00	30.8	73.3	0.47			
20/02/18						
7:00	26	88.5	0.30	27.7	92.69	0.11
8:00	28.5	80	0.13	28.7	87	0.37
9:00	30.3	75.5	0.50	30.7	81.03	0.04
10:00	31.2	71	0.57	32.2	74.46	0.14
11:00	32.3	65.2	0.64	33.2	67.01	0.37
12:00	33.8	63.3	0.65	35.7	63.53	0.17
13:00	33.8	63.3	0.46	35.1	56.89	0.1
14:00	32.6	65.9	0.61	34.8	61.84	0.4
15:00	31.6	71.2	0.79	32.4	61.42	0.29
16:00	32.2	69.2	0.44	27.1	64.94	0.49
21/02/2018						
7:00	26.2	90.8	0.43	29.8	89.92	0.11
8:00	28.7	81.4	0.29	30.4	79.53	0.07
9:00	30	76.7	0.16	35.8	78.46	0.16
10:00	31.4	72.3	0.19	38.5	70.34	0.38
11:00	32.5	67	0.66	37.2	62.46	0.23
12:00	33.8	64.4	0.57	35.5	65.58	0.25
13:00	34.2	55.2	0.44	36.2	84.91	0.61
14:00	34.3	62	0.57	32.6	91.96	0.81
15:00	32.6	68.2	0.56	31.5	91.53	0.28
16:00	30.9	73.3	0.34	30	88.46	-

Lampiran 2: Hasil pengukuran di ruang seminar A saat penghawaan alami

Hari 1 (19/02/18)					
Jam	TA (°C)	RH (%)	Kecepatan angin (m/s)	GT (°C)	MRT (°C)
7:00:00	27.4	80.8	0	27.5	27.5
7:30:00	28.7	75.8	0	28.7	28.7
8:00:00	28.8	73.5	0	28.6	28.6
8:30:00	29.3	70.9	0	29.1	29.1
9:00:00	29.7	69.5	0	29.5	29.5
9:30:00	30.1	67.1	0	29.9	29.9
10:00:00	30.4	65.8	0	30.2	30.2
10:30:00	30.5	66.2	0	30.3	30.3
11:00:00	30.6	62.2	0.3	30.5	30.2
11:30:00	30.8	62.5	0	30.6	30.6
12:00:00	30.5	63.7	0.2	30.3	30
12:30:00	30.5	65.5	0	30.2	30.2
13:00:00	30.4	65.3	0	30.1	30.1
13:30:00	29.9	71.9	0	29.6	29.6
14:00:00	29.7	74	0	29.5	29.5
14:30:00	29.7	74.1	0	29.4	29.4
15:00:00	29.5	72.9	0	29.2	29.2
15:30:00	28.9	75	0	28.7	28.7
16:00:00	28.3	75.5	0	28.2	28.2
Hari 2 (20/02/18)					
Jam	TA (°C)	RH (%)	Kecepatan angin (m/s)	GT (°C)	MRT (°C)
7:00:00	27.4	80.8	0	27.5	27.5
7:30:00	28.7	75.8	0	28.7	28.7
8:00:00	28.3	78.8	0	28.1	28.1
8:30:00	28.5	74.2	0	28.5	28.5
9:00:00	28.9	73	0	28.8	28.8
9:30:00	29.3	70.7	0	29.2	29.2
10:00:00	29.8	65.1	0	29.8	29.8
10:30:00	30.3	63	0	30.2	30.2
11:00:00	30.5	62.7	0.2	30.3	30.2
11:30:00	30.5	62.2	0	30.3	30.3
12:00:00	30.9	61.9	0	30.8	30.8
12:30:00	30.8	60.1	0	30.7	30.7
13:00:00	31.1	62.2	0	31	31

13:30:00	30.8	63.4	0	30.8	30.8
14:00:00	30.7	67.1	0	30.7	30.7
14:30:00	30.5	63.6	0	30.4	30.4
15:00:00	30.2	66.5	0	30.2	30.2
15:30:00	30	66.2	0	29.9	29.9
16:00:00	29.2	66.2	0	29.9	29.9
Hari 3 (21/02/18)					
Jam	TA (°C)	RH (%)	Kecepatan angin (m/s)	GT (°C)	MRT (°C)
7:00:00	27.4	80.8	0	27.5	27.5
7:30:00	27.7	79.7	0	27.6	27.6
8:00:00	28	77.8	0	28	28
8:30:00	28.5	75.8	0	28.6	28.6
9:00:00	29.1	74	0	29.2	29.2
9:30:00	29.7	71.4	0	29.7	29.7
10:00:00	29.9	73.5	0	29.9	29.9
10:30:00	30	71.9	0	30	30
11:00:00	30.2	69.9	0.5	30.1	29.9
11:30:00	30.4	65.8	0	30.3	30.3
12:00:00	30.4	66.2	0	30.3	30.3
12:30:00	30.3	67	0	30.2	30.2
13:00:00	30.5	67.9	0	30.4	30.4
13:30:00	30.8	63.6	0	30.7	30.7
14:00:00	30.6	68.6	0	30.5	30.5
14:30:00	30.3	70.9	0	30.2	30.2
15:00:00	30	71.7	0	29.8	29.8
15:30:00	29.3	70.8	0	29.1	29.1
16:00:00	29	71.4	0	28.9	28.9

Lampiran 3: Hasil pengukuran di ruang 205 A saat kondisi AC menyala

Hari 1 (19/02/18)					
Jam	TA (°C)	RH (%)	Kecepatan angin (m/s)	GT (°C)	MRT (°C)
7:00:00	26.6	60.4	0	26.3	26.3
7:30:00	24.6	57.4	0.02	24.4	24.3
8:00:00	24.7	55.5	0	24.8	24.8
8:30:00	24.9	54	0	24.8	24.8
9:00:00	24.7	52.3	0	24.5	24.5
9:30:00	24.4	53.9	0.02	24.4	24.4
10:00:00	24.8	61.5	0	24.8	24.8
10:30:00	24.9	57.1	0	24.6	24.6
11:00:00	25.1	55.3	0	24.8	24.8
11:30:00	26.6	55.8	0	26.6	26.6
12:00:00	27	59.2	0	27	27
12:30:00	27	63.4	0	26.9	26.9
13:00:00	26.9	65.2	0	26.7	26.7
13:30:00	26	59.4	0.02	25.8	25.7
14:00:00	25.9	58.5	0.02	25.7	25.6
14:30:00	26.6	59.7	0	26.4	26.4
15:00:00	26.7	61.4	0	26.5	26.5
15:30:00	26.5	63.2	0	26.2	26.2
16:00:00	26.1	63.1	0	25.8	25.8
Hari 2 (20/02/18)					
Jam	TA (°C)	RH (%)	Kecepatan angin (m/s)	GT (°C)	MRT (°C)
7:00:00	25.2	65.7	0	25	25
7:30:00	24.6	57.4	0	24.4	24.4
8:00:00	24.6	67.3	0	24.5	24.5
8:30:00	24.7	59.9	0	24.7	24.7
9:00:00	24.6	57.7	0	24.6	24.6
9:30:00	24.8	59	0	24.8	24.8
10:00:00	24.6	62.4	0	24.5	24.5
10:30:00	24.8	63.2	0	24.8	24.8
11:00:00	24.4	63.4	0	24.4	24.4
11:30:00	25	62.7	0	25	25
12:00:00	24.1	63.3	0	24.1	24.1
12:30:00	23.7	63.1	0	23.8	23.8
13:00:00	23.7	64.6	0	23.8	23.8

13:30:00	23.6	64.3	0	23.8	23.8
14:00:00	23.7	66.3	0	23.7	23.7
14:30:00	23.9	63.5	0	23.8	23.8
15:00:00	23.8	62.2	0	23.6	23.6
15:30:00	22.9	61.2	0	22.9	22.9
16:00:00	25.4	60.4	0	25.5	25.5
Hari 3 (21/02/18)					
Jam	TA (°C)	RH (%)	Kecepatan angin (m/s)	GT (°C)	MRT (°C)
7:00:00	25.2	65.7	0	25	25
7:30:00	23.2	57.5	0	23.1	23.1
8:00:00	23.8	60.7	0	23.8	23.8
8:30:00	23.6	56.9	0	23.6	23.6
9:00:00	23.6	56.2	0	23.7	23.7
9:30:00	23.3	54.7	0	23.3	23.3
10:00:00	23.5	66	0	23.6	23.6
10:30:00	23.8	68.7	0	23.8	23.8
11:00:00	23.4	65.4	0	23.4	23.4
11:30:00	22.5	58.7	0	22.5	22.5
12:00:00	22.6	59.8	0	22.8	22.8
12:30:00	22.1	59.4	0	22.2	22.2
13:00:00	22.2	60	0	22.2	22.2
13:30:00	23.3	66.6	0	23.3	23.3
14:00:00	23.6	69	0	23.6	23.6
14:30:00	23.1	69	0	23.1	23.1
15:00:00	23	66.9	0	22.9	22.9
15:30:00	22.5	62.6	0	22.5	22.5
16:00:00	22.9	64.6	0	22.8	22.8

Lampiran 4: Data iklim Surabaya tahun 2013 – 2017

	Tahun	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nov	Des
Temperatur udara (°C)	2017	27.4	27.5	27.9	28.3	28.8	28.1	27.7	27.6	28.5	29.7	28.2	27.8
	2016	29.7	28.7	30	29.6	30.1	29.4	29.1	29.5	29.7	29.1	29.1	28.5
	2015	28.3	28.2	28.5	28.5	29.2	29.2	28.4	28.4	28.9	30	30.9	29.4
	2014	27.6	27.9	29	29.1	30	29.7	29	28.7	28.8	30.2	30.3	28.6
	2013	28.1	28.6	28.7	29	29	28.5	27.9	28.4	29	30.2	29.3	28.1
	rata-rata	28.2	28.2	28.8	28.9	29.4	29.0	28.4	28.5	29.0	29.8	29.6	28.5
Kelembaban (%)	2017	83	82	80	80	74	77	73	69	68	68	79	80
	2016	76	81	77	80	78	79	78	72	74	78	79	80
	2015	78	80	79	80	74	69	70	69	65	65	69	76
	2014	80	80	77	78	75	74	72	69	64	63	68	79
	2013	81	79	79	79	79	80	75	68	64	64	72	80
	rata-rata	80	80	78	79	76	76	74	69	67	68	73	79
Kecepatan angin (m/s)	2017	2.9	3.7	2.6	2.1	2.8	2.6	3.0	3.5	3.6	3.2	2.6	2.9
	2016	2.6	2.6	2.6	3.1	2.6	1.0	1.5	1.5	2.1	2.1	1.5	2.1
	2015	3.6	2.6	2.6	2.6	2.6	3.6	4.6	4.6	5.1	5.1	3.6	3.1
	2014	3.6	2.6	3.1	2.6	3.6	3.6	4.1	4.6	4.6	4.6	3.1	3.1
	2013	3.6	3.1	2.6	3.1	2.6	2.6	3.6	4.1	4.1	3.6	3.1	3.1
	rata-rata	3.2	2.9	2.7	2.7	2.8	2.7	3.4	3.7	3.9	3.7	2.8	2.8
Arah angin	2017	BL	U	U	U	TG	TG	TG	TG	TG	T	U	U
	2016	U/BL	S	U	T	T	T	T	T	T	TG	TL	B
	2015	BL	U	U	U	U	T	T	T	TG	T	T	S/BL
	2014	BL	BL	U	U	T	T	T	T	T	T	U	S
	2013	BL	BL	BL	T	T	T	T	T	T	T	T	BL

sumber: BMKG Surabaya

Lampiran 5: Data iklim Surabaya 2017 (rata-rata per jam)

	Januari			Oktober		
	T (°C)	DEW (°C)	DNS (kW/m ²)	T (°C)	DEW (°C)	DNS (kW/m ²)
1:00	25.6	23.9	0	27.2	23.5	0
2:00	25.5	23.9	0	26.8	23.5	0
3:00	25.4	23.9	0	26.4	23.4	0
4:00	25.3	23.9	0	26.0	23.3	0
5:00	25.5	23.9	0	26.4	23.3	0
6:00	25.6	24.0	0.045581	26.7	23.2	0.139137
7:00	25.9	24.1	0.077831	27.5	23.2	0.228379
8:00	26.9	24.1	0.103669	28.8	23.2	0.299984
9:00	28.3	24.1	0.123274	30.4	23.1	0.349556
10:00	29.6	24.1	0.135395	32.0	22.9	0.38496
11:00	30.6	24.1	0.130008	33.0	22.8	0.396274
12:00	31.1	24.1	0.124016	33.5	22.6	0.395831
13:00	31.1	24.2	0.121476	33.6	22.5	0.38204
14:00	30.7	24.2	0.116911	33.5	22.3	0.353815
15:00	30.0	24.2	0.111298	33.2	22.1	0.309702
16:00	29.1	24.2	0.100121	32.8	22.0	0.236113
17:00	28.1	24.1	0.070258	32.0	22.2	0.134669
18:00	27.2	24.1	0.023323	31.0	22.7	0
19:00	26.5	24.0	0	30.0	23.2	0
20:00	26.2	24.0	0	29.4	23.3	0
21:00	26.0	24.0	0	29.0	23.3	0
22:00	25.9	23.9	0	28.6	23.3	0
23:00	25.8	23.9	0	28.1	23.3	0

sumber: BMKG Surabaya

Lampiran 6: Model eksperimen

		1,75	2,5	3,25	4
<div><div></div><div>Timur-Barat</div><div></div><div>Selatan-Utara</div></div>					

		LUAS JENDELA				
		J1	J2	J3	J4	J5
ASPEK RASIO	1,75					
	2,5					
	3,25					
	4					

Lampiran 7: Setting simulasi di DesignBuilder

Model Options - Building and Block

Model Options Data

Data | **Advanced** | Heating Design | Cooling Design | Simulation | Display | Drawing tools | Block | Project details | Cost/Carbon

Data Options

Model options template Default

Construction and Glazing Data >>

Gains Data

Gains data

Lumped Early Detailed

Occupancy method 1-People/area

Occupancy latent gains 1-Dynamic calculation

Lighting gain units 1-Watts per m2

Early gains
Internal gains are separated into various categories (e.g. occupancy, lighting, computing etc.)

Timing

Timing

Typical workday Schedules

☐ Internal gains operate with occupancy

Schedules
Timing is defined using the schedules and profiles mechanism which allows each day of the week to have a different profile.

HVAC

HVAC

Simple Detailed

HVAC sizing 3-Autosize

Simple HVAC autosize method 1-EnergyPlus

☒ Specify Simple/Design HVAC details

Auxiliary energy calculations 2-Separate fans and pumps

Mechanical ventilation method 2-Ideal loads

Simple HVAC
HVAC systems are modelled using Ideal Loads, fuel consumption is calculated from loads using seasonal efficiencies

Natural Ventilation and Infiltration

Natural ventilation

Scheduled Calculated

Infiltration units 1-ac/h

Airtightness method 1-Template slider

Calculated ventilation
Natural ventilation and infiltration air flow rates are calculated based on opening and crack sizes, buoyancy and wind pressures.

BIM Surfaces >>

PWK, Building 1

Layout
Activity
Construction
Openings
Lighting
HVAC
Generation
Outputs
CFD

Activity Template

Template

Sector

Teaching Areas

D1 Non-residential Institutions - Education

Zone multiplier

1

☒ Include zone in thermal calculations

☒ Include zone in Radiance daylighting calculations

Floor Areas and Volumes

Occupancy

Density (people/m2)

0,5523

Schedule

PWK jadwal okupansi

Metabolic

Activity

Light office work

Factor (Men=1.00, Women=0.85, Children=0.75)

0.90

CO2 generation rate (m3/s-W)

0,0000000382

Clothing

Winter clothing (clo)

0,50

Summer clothing (clo)

0,50

Generic Contaminant Generation

Holidays

DHW

Environmental Control

Heating Setpoint Temperatures

Heating (°C)

18,0

Heating set back (°C)

12,0

Cooling Setpoint Temperatures

Cooling (°C)

25,0

Cooling set back (°C)

28,0

Humidity Control

Ventilation Setpoint Temperatures

PWK, Building 1

Layout
Activity
Construction
Openings
Lighting
HVAC
Generation
Outputs
CFD

HVAC Template

Template

Split no fresh air

Mechanical Ventilation

☐ On

Auxiliary Energy

Pump etc energy (W/m2)

0,0000

Schedule

D1_Edu_ClassRm_Occ

Heating

☐ Heated

Cooling

☒ Cooled

Cooling system

Default

Fuel

1-Electricity from grid

Cooling system seasonal CoP

1,800

Supply Air Condition

Operation

Schedule

PWK jadwal AC

Humidity Control

DHW

Lampiran 8: Properti termal material

Data Report (Not Editable)	
General	
PWK wall	
Source	
Category	Walls
Region	INDONESIA
Definition	
Definition method	1-Layers
Calculation Settings	
Simulation solution algorithm	1-Default
Involves metal cladding	No
Layers	
Number of layers	3
Outermost layer	
Cement/plaster/mortar - cement blocks, cel	
Thickness (m)	0,0150
Bridged?	No
Heat transfer integration mo...	3-Integrated Su
Layer 2	
Brick - burned	
Thickness (m)	0,2700
Bridged?	No
Innermost layer	
Cement/plaster/mortar - cement blocks, cel	
Thickness (m)	0,0150
Bridged?	No
Inner surface	
Convective heat transfer coeffi...	2,152
Radiative heat transfer coeffi...	5,540
Surface resistance (m ² -K/W)	0,130
Outer surface	
Convective heat transfer coeffi...	19,870
Radiative heat transfer coeffi...	5,130
Surface resistance (m ² -K/W)	0,040
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/...	2,448
R-Value (m ² -K/W)	0,579
U-Value (W/m ² -K)	1,728

Data Report (Not Editable)	
General	
PWK ground floor	
Source	
Category	Floors (ground)
Region	INDONESIA
Definition	
Definition method	1-Layers
Calculation Settings	
Simulation solution algorithm	1-Default
Involves metal cladding	No
Layers	
Number of layers	1
Single layer	
Cast Concrete (Dense)	
Thickness (m)	0,3000
Bridged?	No
Heat transfer integration mo...	3-Integrated Su
Inner surface	
Convective heat transfer coeffi...	0,342
Radiative heat transfer coeffi...	5,540
Surface resistance (m ² -K/W)	0,170
Outer surface	
Convective heat transfer coeffi...	19,870
Radiative heat transfer coeffi...	5,130
Surface resistance (m ² -K/W)	0,040
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/...	4,667
R-Value (m ² -K/W)	0,424
U-Value (W/m ² -K)	2,357

Data Report (Not Editable)	
General	
PWK roof	
Source	DesignBuilder
Category	Roofs
Region	General
Definition	
Definition method	1-Layers
Calculation Settings	
Simulation solution algorithm	1-Default
Involves metal cladding	No
Layers	
Number of layers	3
Outermost layer	
Clay Tile (roofing)	
Thickness (m)	0,0250
Bridged?	No
Heat transfer integration mo...	3-Integrated Su
Layer 2	
MW Stone Wool (rolls)	
Thickness (m)	0,2000
Bridged?	No
Innermost layer	
Roofing Felt	
Thickness (m)	0,0050
Bridged?	No
Inner surface	
Convective heat transfer coeffi...	4,460
Radiative heat transfer coeffi...	5,540
Surface resistance (m ² -K/W)	0,100
Outer surface	
Convective heat transfer coeffi...	19,870
Radiative heat transfer coeffi...	5,130
Surface resistance (m ² -K/W)	0,040
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/...	0,198
R-Value (m ² -K/W)	5,191
U-Value (W/m ² -K)	0,193

Data Report (Not Editable)	
General	
Sgl Clr 6mm	
Source	EnergyPlus dat
Category	Single
Region	General
Definition method	
Definition method	1-Material laye
Layers	
Number layers	1
Outermost pane	
Pane type	Generic CLEA
Flip layer	No
Heat transfer integration mo...	3-Integrated Su
Outside Surface	
Fix convective heat transfer co...	No
Inside Surface	
Fix convective heat transfer co...	No
Calculated Values	
Total solar transmission (SHGC)	0,810
Direct solar transmission	0,775
Light transmission	0,881
U-value (ISO 10292/ EN 673) (...)	6,121
U-Value (ISO 15099 / NFRC) (...)	6,121

Lampiran 9: Hasil eksperimen

	A1T	A2T	A3T	A4T	A5T	B1T	B2T	B3T	B4T	B5T	C1T	C2T	C3T	C4T	C5T	D1T	D2T	D3T	D4T	D5T	BC
JAN	6258.2	6399.0	6508.8	6581.6	6667.8	6463.3	6532.7	6802.9	6988.2	7015.1	6455.9	6519.6	6854.6	6958.7	7029.7	6424.9	6568.1	6689.8	6630.6	7022.7	7230.3
OKT	7754.0	7978.2	8126.4	8253.4	8385.2	8117.8	8195.2	8588.1	8901.5	8938.5	8147.8	8215.4	8733.8	8891.8	8998.9	8123.8	8370.1	8531.8	8473.9	9036.1	9300.4
JAN	78.0	78.0	78.5	77.4	77.4	79.7	78.2	77.7	77.1	76.5	80.3	78.2	77.3	76.2	76.7	78.9	78.8	74.7	73.6	76.5	77.0
OKT	98.8	97.1	98.9	98.5	98.9	98.9	98.2	99.1	99.1	99.1	98.8	98.3	99.1	99.1	99.1	97.4	99.1	98.3	98.8	99.1	95.9
	-60.1	-131.9	-175.8	-243.2	-271.4	-106.8	-135.3	-264.0	-350.6	-378.0	-100.0	-129.7	-270.2	-334.6	-390.6	-92.7	-180.3	-196.9	-240.9	-381.9	
	577.7	509.3	407.5	409.0	309.0	367.8	488.6	206.2	63.4	52.0	545.9	421.9	173.4	104.3	45.8	541.9	289.5	482.1	438.8	44.5	
	2109.1	2107.2	2130.8	2110.3	2138.7	2095.3	2055.2	2138.8	2124.8	2123.3	2135.8	2097.6	2158.7	2150.9	2153.1	2092.9	2126.5	2077.3	2077.8	2150.2	
	-2157.1	-2146.7	-2173.6	-2150.6	-2181.7	-2136.9	-2091.9	-2181.2	-2168.2	-2166.7	-2169.5	-2126.8	-2193.4	-2186.2	-2188.6	-2117.9	-2154.4	-2100.3	-2100.9	-2179.5	
	-4233.0	-4288.9	-4357.0	-4370.8	-4432.4	-4328.9	-4272.5	-4433.0	-4543.2	-4555.4	-4420.8	-4367.5	-4578.1	-4620.6	-4675.2	-4383.6	-4515.5	-4431.2	-4459.0	-4665.7	
	-93.6	-77.7	-75.6	-73.0	-70.9	-62.0	-62.4	-55.0	-51.2	-50.5	-47.2	-47.6	-40.1	-38.1	-37.1	-37.8	-33.4	-35.2	-34.1	-27.7	
	159.9	158.6	157.0	157.0	155.7	150.5	151.7	148.3	147.3	147.1	164.7	165.7	162.4	161.8	160.7	167.5	165.8	167.1	166.8	163.9	
	1090.8	1421.4	1764.3	2119.0	2007.9	1369.5	1808.4	2425.9	2838.3	3070.9	1269.5	1460.4	2399.8	2744.7	2985.9	1337.9	1860.9	2248.4	2571.0	3009.9	
	-570.6	-661.7	-679.5	-725.6	-765.2	-669.7	-669.7	-823.4	-901.5	-921.0	-659.3	-661.5	-833.2	-881.8	-912.8	-636.1	-749.0	-714.0	-743.7	-905.5	
	917.4	917.4	917.4	917.4	917.4	894.9	894.9	894.9	894.9	894.9	916.7	916.7	916.7	916.7	916.7	912.6	912.6	912.6	912.6	912.6	
	2172.3	2171.0	2135.5	2142.6	2121.1	2128.5	2168.3	2110.2	2076.3	2075.3	2117.8	2156.1	2156.1	2156.1	2156.1	2133.9	2085.6	2130.6	2123.9	2046.6	
	948.4	1249.1	1535.2	1672.0	1909.3	1475.7	1279.4	2138.7	2624.7	2704.9	1269.5	1460.4	2324.0	2584.9	2814.6	1232.8	1919.5	1560.9	1729.2	2789.9	
	-13.2	-13.7	-14.1	-14.4	-14.7	-14.1	-13.9	-15.1	-15.8	-15.9	-13.9	-14.1	-15.3	-15.7	-15.9	-13.8	-14.8	-15.6	-14.6	-16.0	
	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.3	12.4	12.4	
	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	
	4.3	6.2	6.8	7.6	8.3	5.8	6.3	9.0	10.9	11.2	5.8	6.2	9.7	10.7	11.6	5.4	6.3	10.0	7.7	11.5	
	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.4	0.4	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0	
	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.4	-0.5	-0.6	-1.0	-1.0	-0.4	-0.5	-0.8	-1.0	-1.1	-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	-1.1	
	-7.0	-7.6	-8.3	-8.6	-9.0	-7.9	-7.6	-9.4	-10.3	-10.5	-7.5	-7.9	-9.7	-10.3	-10.8	-7.2	-8.8	-9.1	-8.5	-10.6	
	13.13	13.38	13.58	13.72	13.87	13.53	13.4	14.02	14.35	14.4	13.56	13.44	14.16	14.35	14.48	13.44	13.93	13.7	13.82	14.53	
	71.7	73.2	73.8	70.3	70.4	73.5	73.5	74.8	74.5	74.1	73.3	73.0	72.4	74.1	74.2	71.1	72.3	69.7	69.8	74.5	

	A1S	A2S	A3S	A4S	A5S	B1S	B2S	B3S	B4S	B5S	C1S	C2S	C3S	C4S	C5S	D1S	D2S	D3S	D4S	D5S
JAN	6233.3	6361.3	6459.4	6544.7	6589.3	6406.2	6426.6	6661.3	6805.6	6834.3	6384.6	6399.7	6682.2	6768.3	6819.5	6327.2	6467.1	6526.4	6529.8	6795.5
OKT	7662.8	7880.8	7962.7	8137.2	8151.8	7839.7	7904.3	8181.1	8347.4	8391.9	7819.9	7883.4	8192.9	8304.9	8376.2	7801.2	8029.0	8055.7	8148.8	8382.2
JAN	82.6	82.9	82.9	83.6	83.8	83.2	83.3	83.3	84.4	84.2	83.2	83.3	84.4	84.8	85.2	82.4	83.5	83.5	83.5	83.8
OKT	96.1	96.8	97.4	97.0	97.3	97.7	97.4	97.7	97.9	98.0	97.1	97.1	97.9	97.9	97.9	97.4	97.7	97.4	97.3	98.0
JAN: MODA PASIF	Glazing (kW)	-73.3	-144.0	-182.6	-257.1	-273.9	-113.7	-33.8	-357.8	-357.8	-104.1	-131.7	-257.9	-314.7	-359.2	-90.2	-173.4	-190.5	-231.2	-350.0
	Walls (kW)	617.9	569.2	488.2	472.0	417.9	424.1	503.6	297.0	193.0	457.9	538.1	265.1	212.6	164.3	537.6	344.6	469.2	432.8	154.0
	Ceilings (kW)	2123.8	2111.8	2126.7	2118.3	2128.4	2089.4	2062.8	2093.4	2091.2	2125.5	2100.1	2129.9	2116.0	2115.8	2086.0	2102.1	2072.8	2070.7	2107.1
	Floors (kW)	-2168.3	-2153.9	-2171.1	-2154.5	-2165.4	-2126.3	-2096.2	-2142.9	-2130.2	-2155.4	-2126.6	-2159.4	-2145.7	-2145.4	-2107.8	-2125.8	-2093.4	-2091.2	-2130.9
	Ground Floors (kW)	-4168.8	-4217.0	-4268.0	-4297.0	-4327.5	-4216.3	-4188.3	-4309.2	-4383.9	-4302.1	-4276.1	-4426.6	-4458.8	-4505.2	-4272.9	-4372.0	-4326.4	-4351.1	-4490.3
	Partitions (kW)	-83.3	-78.1	-76.0	-62.9	-60.6	-55.9	-56.0	-49.3	-45.8	-44.9	-43.1	-43.2	-36.5	-34.7	-34.6	-30.8	-32.3	-31.2	-25.6
	Roofs (kW)	142.6	141.8	140.6	139.8	139.1	142.8	143.6	141.0	140.2	140.1	160.5	161.2	158.7	158.2	167.1	165.7	166.6	166.3	164.2
	Air Change per Hour (ACH)	736.9	1170.7	973.3	1412.3	1358.0	895.6	1189.3	1609.5	1833.4	1990.0	870.5	1157.3	1535.9	1765.7	1924.5	907.5	1195.9	1463.8	1918.7
	External Infiltration (kW)	-472.3	-568.6	-585.2	-630.3	-661.4	-536.9	-565.6	-691.6	-734.0	-759.2	-524.3	-553.7	-673.6	-714.3	-740.9	-529.5	-596.4	-600.2	-728.5
	General Lighting (kW)	917.4	917.4	917.4	917.4	917.4	894.9	894.9	894.9	894.9	916.7	916.7	916.7	916.7	916.7	912.6	912.6	912.6	912.6	912.6
	Occupancy (kW)	2134.8	2141.3	2113.2	2112.6	2105.4	2110.1	2143.7	2106.5	2075.1	2103.4	2135.2	2156.1	2069.6	2063.5	2123.1	2083.0	2117.5	2112.4	2054.6
	Solar Gains Exterior Windows (kW)	820.2	1109.2	1335.5	1506.8	1621.1	1206.8	1126.7	1787.0	2147.6	1193.5	1215.3	1905.1	2116.1	2306.8	1033.8	1563.3	1373.1	1524.2	2275.3
	Sensible Air Cooling [GJ]	-13.1	-13.6	-13.9	-14.3	-14.4	-13.7	-13.8	-14.6	-15.1	-15.2	-13.6	-13.7	-14.7	-15.0	-13.5	-14.2	-14.0	-14.2	-15.2
	People Sensible Heat [GJ]	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4
JAN: MODA AKTIF	Lights Sensible Heat [GJ]	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.2	3.2	3.2	3.2	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
	Window Heat Addition [GJ]	3.8	5.2	6.1	7.0	7.2	5.3	5.3	7.8	9.2	9.5	5.2	5.2	8.2	9.1	9.8	4.7	6.8	6.3	7.0
	Infiltration Heat Addition [GJ]	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	Opaque Surface Conduction [GJ]	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Window Heat Removal [GJ]	-0.3	-0.5	-0.6	-0.8	-0.7	-0.4	-0.5	-0.8	-0.9	-1.0	-0.4	-0.5	-0.8	-0.9	-1.0	-0.4	-0.6	-0.7	-0.8
	Opaque Surface Conduction [GJ]	-6.6	-7.3	-7.7	-8.1	-8.2	-7.3	-7.2	-8.6	-9.3	-9.5	-7.3	-7.3	-8.9	-9.3	-9.8	-6.9	-8.1	-7.8	-9.6
	Opaque Surface Conduction [GJ]	13.08	13.32	13.49	13.65	13.73	13.34	13.3	13.76	14.02	14.07	13.34	13.31	13.85	14.01	14.1	13.26	13.63	13.52	14.12
	IKE (kWh/m²/lin)	75.0	75.2	75.8	75.8	76.5	77.0	74.7	75.5	78.2	77.6	77.3	74.5	77.9	78.5	74.7	77.9	76.4	74.2	78.5
	Discomfort SNI (%)																			

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Henni lahir di Medan pada tanggal 6 Juli 1995. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Hendrianto Lisanuddin dan Rustini Onggo. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SD Kristen Kalam Kudus Surabaya pada tahun 2000-2006, dilanjutkan di SMP Kristen Petra 1 Surabaya pada tahun 2006-2009, kemudian menempuh pendidikan di SMA Kristen Petra 1 Surabaya tahun 2009-2012. Tahun 2012-2016, penulis menempuh pendidikan program S1 Jurusan Arsitektur Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pada tahun 2016, penulis melanjutkan jenjang pendidikan program S2 Jurusan Arsitektur Lingkungan Fakultas Arsitektur, Desain dan Perencanaan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.